

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МІСЬКОГО  
ГОСПОДАРСТВА імені О. М. Бекетова

**В. Е. АБРАКІТОВ**

# **ПРОПОЗИЦІЇ ДО КОНСТРУЮВАННЯ ЗАСОБІВ БОРОТЬБИ З ШУМОМ**

Монографія

**Харків  
ХНУМГ  
2014**

УДК 628.517.2  
ББК 38.93  
А16

**Рецензенти:**

**Л. І. Нефьодов**, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри Автоматизації і комп'ютерно-інтегрованих технологій Харківського національного автомобільно-дорожнього університету;

**В. Д. Мартовицький**, доктор технічних наук, професор, президент Донбаського регіонального відділення Міжнародної академії наук безпеки й екології;

**Я. О. Серіков**, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри «Безпека життєдіяльності» Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова

*Рекомендовано вченою радою Харківського національного університету  
міського господарства імені О. М. Бекетова  
(протокол № 5 від 27 грудня 2013 року)*

**Абракітов В. Е.**

A16 Пропозиції до конструювання засобів боротьби з шумом: монографія / В. Е. Абракітов; Харк. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Х.: ХНУМГ, 2014. – 205 с.

ISBN 978-966-695-336-3

Дана робота присвячена опису особистих наукових розробок автора, присвячених проблемі зменшення інтенсивності розповсюдження звуку. В роботі розглянуто авторські винаходи й висунуті ним теоретичні положення, присвячені боротьбі із шумом. Це надає підстави для проведення різноманітних акустичних розрахунків, вирахування очікуваних рівнів звуку тощо. Книга ілюструється кресленнями запропонованих автором пристроїв, побудованих за рахунок застосування на практиці теоретичних положень роботи.

УДК 628.517.2  
ББК 38.93

ISBN 978-966-695-336-3 ©Абракітов В. Е., 2014  
© ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2014

## ЗМІСТ

1. ШУМ ЯК ШКІДЛИВИЙ ФАКТОР СЕРЕДОВИЩА ІСНУВАННЯ ЛЮДИНИ.....	6
1.1. Актуальність проблеми боротьби з шумом та її відображення в законодавчих актах України.....	6
1.2. Медичні аспекти проблеми боротьби з шумом.....	8
1.3. Розповсюдження шуму в пружному середовищі...	9
Висновки до розділу 1.....	12
2. ХВИЛЬОВІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ШУМУ.....	13
2.1. Звукові хвилі як один з видів хвиль.....	13
2.2. Характеристики звуку.....	14
Амплітудні характеристики звуку.....	15
Частотні характеристики звуку.....	22
Просторові характеристики.....	28
Тимчасові характеристики.....	29
Характеристики середовища розповсюдження.....	30
2.3. Вимірювання рівнів шуму.....	34
2.4. Нормовані характеристики звуку.....	37
Висновки до розділу 2.....	47
3. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ІНЖЕНЕРНИХ РІШЕНЬ ДЛЯ ОСЛАБЛЕННЯ ІНТЕНСИВНОСТІ ЗВУКУ.....	48
3.1. Пошук шляхів розв'язання проблеми.....	48
3.2. Відбиття звуку.....	49
3.3. Аналогія до відомого явища обертання площини поляризації світла в додаванні до явищ розповсюдження звуку.....	51
3.4. Повне внутрішнє відбиття хвиль.....	53
3.5. Основні відомості про поляризацію хвиль.....	56
3.6. Якщо поляризувати звук?.....	58
3.7. Фізичні основи поляризації звуку.....	59
Висновки до розділу 3.....	61

4. АВТОРСЬКІ НАУКОВІ ТЕОРІЇ ОСЛАБЛЕННЯ ІНТЕНСИВНОСТІ ЗВУКУ ПРИ СТВОРЕННІ ШУМОЗАХИСНИХ ЗАСОБІВ.....	62
4.1. Теза про принципову неможливість зниження шуму в джерелі виникнення до нуля дБ.....	62
4.2. Наукова теорія, що пояснює процеси зниження шуму при переході звуковою хвилею границі розподілу середовищ.....	63
4.3. Фізичні основи поляризації звуку.....	67
4.4. Застосування повного внутрішнього відбиття додатково до поляризації звуку.....	81
4.5. Алгоритм розрахунку конструктивних параметрів багатошарових звукоізолюючих панелей типу «Сандвіч» з використанням явища поляризації звуку.....	84
4.6. Програма для обчислення конструктивних параметрів багатошарових звукоізолюючих панелей типу «сандвіч» з використанням явища поляризації звуку.....	90
4.7. Застосування вакуумованих пристроїв для створення твердих звуконепроникнених перешкод та спосіб оперативного регулювання часу реверберації звуку в приміщеннях.....	92
4.8. Багаторазові відбиття та самоузгодження хвильового поля при розповсюдженні між двома шарами матеріалу.....	105
4.9. Теза про обов'язкову сумісну дію звукопоглинання та звукоізоляції.....	115
4.10. Вплив мікроструктури пористих матеріалів на їхні звуковбирні властивості.....	122
Висновки до розділу 4.....	125

5. ІНЖЕНЕРНІ Й КОНСТРУКТИВНІ РІШЕННЯ ПРИ СТВОРЕННЯ ШУМОЗАХИСНИХ ЗАСОБІВ....	128
5.1. Багатошарова звуковбирна панель, що обгороджує.....	128
5.2. Звукоізолюючий тамбур.....	138
5.3. Головний телефон як засіб індивідуального захисту органів слуху.....	140
5.4. Шумоізолюючий кофердам.....	145
5.5. Пристрій аускультативної діагностики.....	149
5.6. Пристрій вибірного прийому звукових хвиль.....	158
5.7. Звукоізолююча панель з максимально можливою звукоізолюючою здатністю.....	164
5.8. Застосування наших винаходів в науково- технічній діяльності інших дослідників.....	174
Висновки до розділу 5.....	182
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	184
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	187

# **1. ШУМ ЯК ШКІДЛИВИЙ ФАКТОР СЕРЕДОВИЩА ІСНУВАННЯ ЛЮДИНИ**

## **1.1. Актуальність проблеми боротьби з шумом та її відображення в законодавчих актах України**

Громадяни України мають право на безпечні для здоров'я умови праці, навчання, виховання, побуту, відпочинку та навколишнє природне середовище, гарантоване Конституцією України [1], ст. 153 КЗоП, ст. 4 Закону України "Про охорону праці" [2], а також ст. 24 Закону України "Про забезпечення санітарного та епідемічного благополуччя населення" [3], де саме йде мова про захист населення нашої держави від шкідливого впливу неіонізуючих випромінювань, **шуму**, вібрації та інших фізичних факторів [4, 5, 6].

Особливого значення при цьому набувають питання охорони навколишнього середовища і, зокрема, захист міських забудов від шумового забруднення. Одним з небезпечних і шкідливих факторів техногенного середовища, поряд з іншими, що перелічені в підзаконних актах, є шум, здатний впливати на стан здоров'я людини й комфортність умов її існування. Стаття 24 Закону України [3] прямим чином твердить про необхідність захисту населення нашої держави від шкідливого впливу акустичних випромінювань. Значні рівні звукового тиску згідно з ГОСТ 12.0.003-74\* [7] класифікуються як шкідливий (і навіть небезпечний) виробничий фактор [8].

Шумом називається звук, який порушує тишу, постійно заважає слуховому сприйняттю і може призводити до порушення здоров'я. Шум навколишнього середовища - це рівень звуку, який звичайний для певного місця - цеху, заводу, вулиці тощо. Він виникає від цільного

впливу багатьох джерел шуму (ДШ), що можуть знаходитися на різних відстанях. Незалежно від походження шум є шкідливим чинником, що впливає на людину. Особливо шкідливий міський шум, який супроводжує людину постійно протягом всієї доби і упродовж усього його життєвого процесу.

Усе частіше й частіше на найперше місце виступають питання забезпечення акустичного комфорту та акустичної безпеки середовища мешкання Людини. Відмінною рисою сучасних міст у нашій країні і за рубежем є інтенсивний їхній ріст при обмежених просторових рамках. Це приводить до зближення, а найчастіше до тісного переплетення різних функціональних зон міста. У таких умовах неминучий негативний вплив одних зон на інші. Особливе значення при цьому здобувають питання охорони навколишнього середовища і, зокрема, захист міських забудов від шумового забруднення. Шум, створюваний безліччю різноманітних джерел, неймовірним образом забруднює урбанізований простір сучасних міст, негативно позначається на здоров'ї і психологічному стані їхніх жителів, найчастіше є причиною психічних розладів і соціально-побутових конфліктів.

Впровадження у виробництво нових технологічних процесів, підвищення потужностей і швидкодійності технологічного устаткування, механізація виробничих процесів призвели до того, що робітники на виробництві протягом зміни також більшою чи меншою мірою зазнають негативного впливу шуму.

Це затверджується цілою низкою інших нормативних документів [4-6, 9, 10, 11-18]. Порушення цих норм зовсім

неприпустиме та призводить до порушень нормального життєвого циклу Людини [19], а також до багатьох різноманітних хвороб [20-24].

Згідно з гігієнічною класифікацією праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу, затвердженої Наказом Міністерства охорони здоров'я України № 528 від 27.12.01 [8], надається визначення класу умов праці в залежності від рівнів шуму та перевищення граничнодопустимих рівнів (ГДР) ультразвуку та інфразвуку. При тому рівні, що менше та дорівнюють ГДР, визначають допустимий клас умов праці; рівні звуку 85-115 дБА - шкідливий клас умов праці; рівні звуку > 115 дБА - небезпечний.

Нейросенсорна приглухуватість (код Н903 згідно з Міжнародною статистичною класифікацією хвороб та споріднених проблем МКХ-10) під систематичним впливом виробничого шуму входить в Перелік професійних захворювань, затверджений Постановою Кабінету Міністрів України № 1662 від 8.11.2000 р. [8].

## **1.2. Медичні аспекти проблеми боротьби з шумом**

Так, шкідливий вплив шуму на людину сьогодні загальноновизнаний й проявляється в широкому діапазоні впливів, від суб'єктивних роздратувань до об'єктивних патологічних змін в органах центральної нервової й серцево-судинної систем [25]. У сучасному місті шум супроводжує людину практично постійно й повсюдно.

Шум діє не тільки на органи слуху. Подразнення шумом крізь волокна слухових нервів передається на центральну нервову та вегетативну нервові системи. Через ці системи шум негативно впливає на внутрішні органи



людини, що призводить до значних змін у функціональному стані організму, впливає на психічний стан людини, викликаючи турботу та подразнення [26, 27].

Вплив шуму на центральну нервову систему викликає збільшення латентного періоду зорово-моторної діяльності, призводить до порушення рухомості нервових процесів, зміні енцефалографічних показників, порушує біоелектричну активність головного мозку із проявом загальних функціональних змін, суттєво змінює біопотенціали мозку, їхню динаміку, викликає біохімічні зміни у структурах головного мозку [21-29]. Люди, що знаходяться під впливом шуму, скаржаться на роздратованість, головний біль, запаморочення, підвищену утомливість, зменшення апетиту, та ін. Це є симптоми так званої "шумової хвороби", до симптомів якої віднесені: підвищення кислотності, серцево-судинна недостатність, нейроендокринні розлади.

Концепцію біологічної еквівалентності ефектів впливу шуму та нервового навантаження розглянуто в роботі [29].

Для захисту людей, що випробують негативну дію шуму, потрібне застосування комплексу заходів - технічних, організаційних і медико-біологічних.

### **1.3. Розповсюдження шуму в пружному середовищі**

Міський шум має тенденцію до зростання [30]. Точну кількісну оцінку того процесу збільшення рівнів надати дуже важко; але, наприклад, за даними [31] середнє щорічне зростання рівнів шуму описується значенням 0,5 дБА в рік.

Незадовільний стан справ у галузі акустичної безпеки населення негативно впливає на фінансово-економічну діяльність промисловості України [32].

Шум впливає на людину не тільки в умовах виробництва, поблизу автотраси, аеродрому, залізниці, або в побуті [33], - але й на будівельних майданчиках при зведенні будинків й споруд, або ремонті, реконструкції їх у сучасних стиснутих умовах міський забудови, де має надто високі рівні й часто формує шумовий режим цілих районів [34 -56].

В роботах [57, 59, 60, 61] ми наводимо власні авторські дані - результати натурних вимірів шуму, що були проведені нами в м. Харків. Вони показали цілком незадовільну картину стану акустичної безпеки великого міста та містять значну кількість даних, накопичених від дуже великої кількості вимірів, що перебільшують встановлені нормативні рівні. Отже, про значну зашумованість ми говоримо не голослівно!

Виміри [57] підтвердили припущення, які щонайкраще ще в 70-і рр. минулого століття висловив англійський акустик Р. Тейлор: «...Самая распространенная и серьезная причина тугоухости, вызванной шумом, — это воздействие высоких уровней шума на рабочих местах, будь то кабина дизельного грузовика, литейный завод или другие самые различные предприятия — от типографии до фабрики синтетических материалов. Если исключить взрывы и стрельбу, то повреждение слуха шумом вне связи с работой — событие маловероятное. Как бы ни раздражал человека шум самолетов или наземного транспорта, он вряд ли может вызвать физиологическое повреждение слуха...» [62].

Проте, зафіксовані [57] рівні шуму, хоча й не можуть викликати патологічні зміни слуху або інші фізіологічні порушення, украй несприятливо впливають на психіку

людини й організм, викликають безсоння, роздратування, підвищену стомлюваність і т.п. Дані рівні перевищують установлені для них нормативні значення [18], - і таким чином, на підставі досліджень [57] варто говорити про акустичний дискомфорт населення, що проживає або перебуває на вулицях м. Харкова.

Дослідженням зашумованих об'єктів, а також розробкою методів і засобів зниження їхньої акустичної активності, зайнято сьогодні багато фахівців в Україні й за рубежом [58]. В останні 10 років, проблема боротьби із шумом на близько розташованих до джерел шуму виробничих і житлових територіях стає все гостріше. Високі темпи механізації й індустріалізації будівельних робіт, інших технологічних процесів, збільшення швидкості, енергоємності, продуктивності, і потужності застосовуваного устаткування незмінно супроводжуються збільшенням шуму і вібрації. Шумові характеристики устаткування машин і механізмів, використовуваних у будівництві (за авторськими даними [63, 64]) наведено в роботі [65] та багатьох інших виданнях. Наприклад, дані наших власних експериментальних досліджень (вимірювань) рівнів та побудовані нами особисто спектри шуму наводяться: [66] – при роботі кондиціонерів в будинках як одна з найбільш актуальних проблем сучасної урбанізації, [67, 68] – у різних транспортних засобах, а [69] описує наші дослідження шумів ліфтового вузла в будинках різних типів.

Окремо слід казати про проведені особисто нами дуже чисельні натурні виміри (кількість їх вимірюється тисячами) на міських територіях, результати яких (у вигляді одержаних спектрів шуму) наведені в таких

наукових роботах автора, як [57, 66, 70, 59, 71, 72, 60, 61, 67, 73, 74, 75, 68, 76], та ін.

Подібні дані, що свідчать про значні рівні шуму в інших галузях сьогодення, наводяться в безлічі робіт інших авторів, що досліджували ту проблему в своїх областях. Слід зробити висновок, що сучасна цивілізація просто-таки потопає в колосальних значеннях звукової енергії, випромінюваних її дітищами, із кожним роком справа в цій області все погіршується і погіршується!

### **Висновки до розділу 1**

У першому розділі поставлена проблематика наукової роботи та розглянуті багатогранні питання основного напрямку, в яких розвивалися дослідження автора. Зовсім не досить тільки-но знати, як саме розповсюджується шум; треба ще конкретно вести боротьбу з ним, тобто конструювати найефектніші протишумові прилади [77].

У наших дослідженнях саме поширення небезпечного для здоров'я звуку (шуму) обрано для вивчення як процес або явище, що породжує проблемну ситуацію; звідки випливає їхня головна мета - боротьба з акустичним забрудненням навколишнього середовища, тобто формування різноманітних заходів для формування акустичного комфорту робітників підприємств та населення. Предметом досліджень при цьому виступають процеси розповсюдження шуму з рівнями, що перевищують нормативні, невідомі прояви впливу шуму, засоби боротьби із шумом.

## 2. ХВИЛЬОВІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ШУМУ

### 2.1. Звукові хвилі як один з видів хвиль

Хвилі – це збурювання, які поширюються з кінцевою швидкістю в просторі, і несуть енергію без переносу речовини [78 - 79].

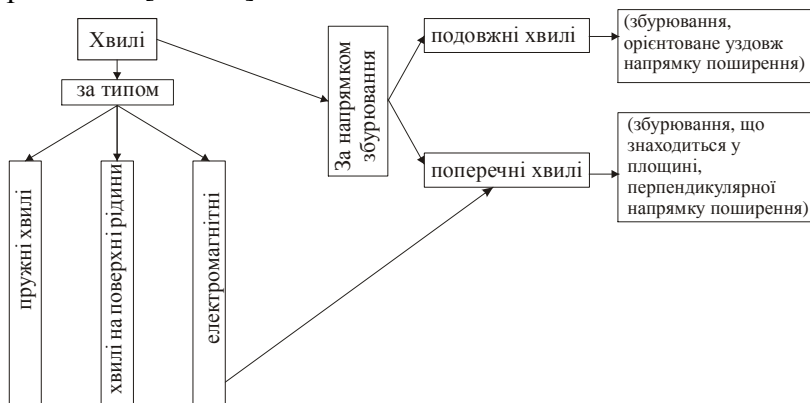


Рис. 2.1 – Класифікація видів хвиль за типом та напрямком збурювання

Звукові хвилі є частковим випадком хвильового руху, та відносяться до так званих пружних хвиль. В рідинах та газах розповсюджуються тільки подовжні звукові хвилі, в твердому середовищі – як подовжні, так і поперечні [81, 80] (докладніше – див. далі).

Звукові хвилі, як згадувалося вище, здатні розповсюджуватися тільки в середовищі, що має пружні властивості. Єдиним прикладом середовища, що не є пружним, є вакуум: (тобто звукові хвилі в вакуумі не розповсюджуються [82]).

Уявимо собі розташування часток пружного середовища в незбуреному просторі. Ця умовна картина надана на рис. 2.1.а. На рис 2.1.б. надана умовна картина розташування тих же самих часток у середовищі, що

збурене звуковою хвилею, яка проходить через те середовище. Через те, що кожна частка під впливом зовнішнього збурення (яке передається через сусідні, суміжні частки) випробує коливальний рух, утворюються стиснуті та розріджені області розподілу часток у просторі.

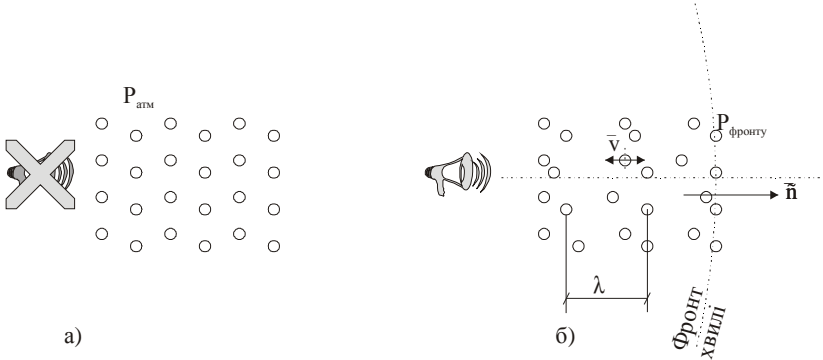


Рис. 2.2 – Умовне зображення розташування пружних часток у незбуреному (а) та збуреному (б) середовищі

## 2.2. Характеристики звуку

Поширення хвилі визначається декількома групами характеристик, представленими на рис. 2.3:

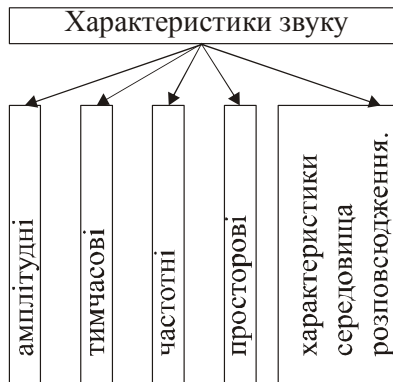


Рис. 2.3 – Все різноманіття хвильових характеристик, що описують розповсюдження звукової хвилі, може бути зведено до п'яти груп

**Амплітудні характеристики звуку** визначають величину коливання; а, у найбільш загальному змісті, – величину енергії, що переноситься хвилею.

Отже, звукові хвилі не викликають істотних переміщень середовища, за винятком його коливальних рухів. Перенос матеріалу середовища не відбувається. Переміщується в просторі й часі тільки саме по собі збурення; слід говорити про "фронт хвилі", (що геометрично з'єднує всі точки збуреного середовища, що знаходяться в однакових фазах). Отой хвильовий фронт переміщується від джерела звуку в усіляких напрямках, а вимір швидкості його поширення дозволяє говорити про швидкість розповсюдження звуку.

Найважливішим моментом при розгляді такої умовної моделі є той безперечний факт, що кожна частинка пружного середовища змінює свою позицію в просторі лише в незначних межах. Вона первісно подається вперед, потім - назад; потім - знову вперед, потім - знову назад і т.п.; істотного переносу самого середовища за рахунок переміщення часток не відбувається. Цей розмах коливань відносно якогось вихідного, первісного положення, зветься амплітудою, і вимірюється в одиницях довжини. При розповсюдженні звуку в звичайних умовах слід говорити про амплітуди, що не перевищують міліметрів.

Напрямок тих коливань також відіграє дуже важливу роль. Якщо напрямок коливань часток збігається з напрямком розповсюдження звукової хвилі, говорять про подовжні хвилі; а якщо він перпендикулярний - поперечні хвилі. З-за особливостей побудови внутрішньої структури в рідинах і газах коливання в напрямку, перпендикулярному напрямку розповсюдження хвилі, не

відбуваються, тобто в рідинах та газах розповсюджуються тільки подовжні хвилі. В твердому середовищі коливання можуть бути орієнтованими за різними напрямками, тобто, в них існують як подовжні, так і поперечні хвилі.

Вектор коливальної швидкості  $\overline{v}_L$  в подовжній хвилі спрямований з вектором швидкості її поширення  $\overline{c}_L$  (тобто з напрямком її поширення), у поперечній хвилі еквівалентний вектор  $\overline{v}_c$ , називаний вектором зсуву, перпендикулярний до вектора швидкості її поширення  $\overline{c}_c$ , причому  $\overline{c}_L \neq \overline{c}_c$ .

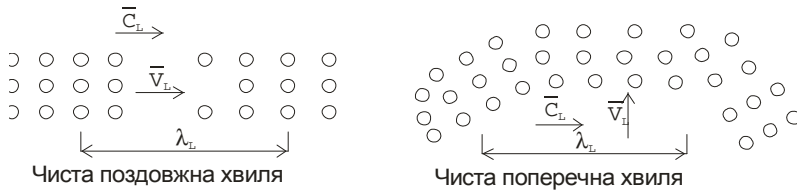


Рис. 2.4 – Вектори коливальної швидкості  $\overline{v}_L$ ,  $\overline{v}_c$  і швидкості поширення  $\overline{c}_L$ ,  $\overline{c}_c$  в різних типах хвиль.  $\lambda_L$  - довжина хвилі, м: (тобто відстань між двома точками, що коливаються у однаковій фазі)

Коливальна швидкість хвилі  $v$ , як відомо, її основний енергетичний параметр, що визначає амплітуду зсуву часток  $Y$ , м залежно від частоти  $f$ , Гц.

$$v = 2\pi Y f, \text{ м/с.}$$

При цьому в реальних подовжньо-поперечних хвилях, для яких у фізиці прийняті спеціальні назви: вигинова хвиля, крутильна хвиля й ін., амплітуда подовжньої  $Y_L$  і



поперечної  $Y_c$  складових, природно, не рівні між собою, і тип, (вірніше, конкретна назва: вигинова, крутильна й т.д.) хвилі визначається вищеописаною енергетикою хвильового руху аж до чистих поздовжніх хвиль у рідинах і газах (де  $Y_c = 0$ ).

Якщо наше умовне середовище - газ (повітря), можливо виміряти його тиск в обох випадках. У випадку незбуреного середовища це буде звичайний атмосферний тиск  $P_{\text{атм}}$ , Па. У випадку середовища, збуреного проходженням звукової хвилі, вимірний тиск відрізняється від атмосферного (назвемо його  $P_{\text{фронту}}$ , Па - тиск у фронті звукової хвилі).  $P_{\text{фронту}}$  може бути як менше, так і більше атмосферного; в залежності від того, область розрідження чи стиснення проходить через точку виміру; а взагалі в часі вони змінюють одна одну за законом гармонійних коливань. Різниця тисків в збуреному та незбуреному середовищі зветься звуковим тиском  $P$ , Па:

$$|P| = P_{\text{фронту}} - P_{\text{атм}}, \text{ Па.}$$

Людина відчуває в якості характеристики звуку саме цю різницю тисків, тобто звуковий тиск; атмосферний тиск, над яким при звуковому збуренні стаються перебільшення / переменшення тиску, ми не відчуваємо. Кажучи більш точніше, у суб'єктивному відчутті Людини вплив амплітудних характеристик задля сприйняття звукових хвиль визначає голосність звуку.

Слід відзначити, що людське вухо неспроможне розрізняти найменші звукові тиски, що лежать в межах від  $0 < P < P_0 = 2 \cdot 10^{-5}$  Па. Сюди відноситься, наприклад, шум молекул при їхньому зіткненні (що насправді існує, та може бути зафіксований за допомогою мікрофону із (найпотужнішим) підсилювачем, та ін.) Найменші,

найтихіші звуки характеризуються граничним значенням  $P_0 = 2 \cdot 10^{-5}$  Па. Отже, діапазон чутності звуку (за гучністю) лежить в межах  $P_0 = 2 \cdot 10^{-5}$  Па  $< P < P_{\text{больове}} = 10^2$  Па, де  $P_{\text{больове}}$  - так званий поріг больового відчуття. При його перебільшенні людина вже не чує звук як звук, а відчуває замість того біль; подальше перебільшення призводить до втрати слуху, робить руйнування в організмі і таке інше. Таке перебільшення фактично переводить звукову хвилю в розряд ударних хвиль, і деякі хвильові особливості, що (з точки зору скрупульозного фізичного підходу) відрізняють звукову хвилю від ударної, із значним підвищенням  $P$  затираються.

Таким чином, якщо потребується графічно зобразити звуковий тиск на осі координат, початок її відліку не може збігатися із нулем (початок відліку - від величини  $P_0 = 2 \cdot 10^{-5}$  Па); крім того, при такій побудові виникають проблеми, що пов'язані з великим діапазоном (від  $10^{-5}$  до  $10^2$ ; фактично це означатиме необхідність градувати таку шкалу на 10 мільйонів поділок). Тому в акустиці прийнято, (логарифмувавши означену шкалу), вимірювати не абсолютні значення звукового тиску  $P$ , Па, а відносні логарифмічні величини - рівні звукового тиску  $L$ , дБ. Рівень звукового тиску зв'язується з (абсолютним) значенням звукового тиску  $P$ , Па залежністю:

$$L = 20 \lg P/P_0, \text{ дБ.}$$

В розглянутому прикладі ми взяли для розгляду таку характеристику, як тиск газу (звуковий тиск та його рівень). Це обумовлено тим, що рівні звукового тиску на практиці вимірюють шумомірами, які в якості приймача застосовують мікрофон (що реагує саме на звуковий тиск). Як бути у випадку, наприклад, твердого тіла (що просто не

може бути характеризовано через який-небудь тиск)? В такому разі використовується така характеристика, як коливальна швидкість  $v$ , м/с, (граничне значення  $v_0 = 2 \cdot 10^{-5}$  м/с якої відповідає граничному значенню  $P_0 = 2 \cdot 10^{-5}$  Па); та рівень коливальної швидкості:

$$L = 20 \lg v / v_0, \text{ дБ};$$

приймачем в вимірювальних пристроях є датчик коливальної швидкості. Якщо розмірковувати про звукову енергію (що більш правильніше, тому що звуковий тиск та коливальна швидкість є локальними характеристиками звукової енергії), то тут застосовують порогові значення інтенсивності  $I_0 = 10^{-12}$  Вт/м<sup>2</sup>;  $I_{\text{большое}} = 10^2$  Вт/м<sup>2</sup>; рівень інтенсивності звуку

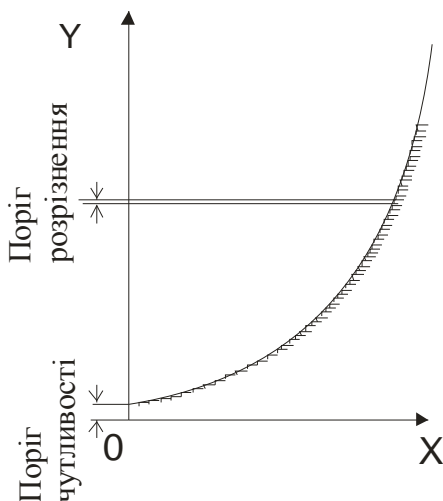
$$L = 10 \lg I / I_0, \text{ дБ}.$$

В будь-якому разі, логарифмічна шкала має початок відліку з 0 дБ, (а не з якоїсь малозрозумілої некваліфікованому користувачеві чисельної величини); діапазон чутних звуків

$$I_0 = 10^{-12} \text{ Вт/м}^2 < I < I_{\text{большое}} = 10^2 \text{ Вт/м}^2$$

уміщається в 140 дБ.

Застосування децибелів має ще інші переваги. Загальновідомі психофізіологічні дослідження Вебера та Фехнера довели, що сприйняття людиною відчуттів (звук, світло, інші подразники) здійснюються нелінійно.



*Рис. 2.5 – Східчасте збільшення будь-яких відчуттів людини  $Y$  в залежності від збільшення величини подразника  $X$  (згідно з дослідженнями в галузі психофізіології)*

Вчений Вебер довів, що приріст аби якого відчуття (у відповідності приросту подразника) відбувається не плавно, а східчастим чином; визначив величину одиниці такого східчастого графіку, тобто поріг (ми вже оперували поняттями поріг сприйняття звуку, поріг больового відчуття); Фехнер же довів, що форма графіка апроксимується логарифмічною залежністю (залежність Вебера-Фехнера):

$$Y = \log X + C$$

де  $Y$  - величина приросту відчуття, що сприймається;  $X$  - величина приросту подразника;  $C$  - константа (поріг сприйняття подразника). Докладніше це можна прочитати в літературі по психофізіології, (або, наприклад, в [83]).

Так от, дослідження довели, що слухові відчуття (у

відповідності до закону Вебера-Фехнера) сприймаються сходинками величиною в 1 дБ. Таким чином, застосування логарифмічних рівнів не тільки складає зручності в математичному плані, але й в повній мірі відповідає психофізіологічним особливостям організму людини. Завдяки цьому, наприклад, легко пояснюється такий (первісно малозрозумілий) факт: магнітофон із двома акустичними системами не дає точно в два рази більшу гучність, аніж той самий магнітофон із однією акустичною системою. Гучність, звісно, буде вище, але не в два рази? Відповідь в тому, що ми маємо справу із рівнями, що складаються між собою за правилами складання логарифмів.

Ця задача важлива при розгляді поставлених в цій книзі питань. Якщо одночасно працюють декілька джерел шуму з рівнями звукового тиску  $L_{Ri}$ , то в розрахунковій точці сумарний розмір рівня звукового тиску визначається при складанні рівнів (в дБ) за правилами складання логарифмів, що існують в математиці. Енергетична сумація рівнів звуку здійснюється за співвідношенням

$$L_{\Sigma} = 10 \lg \Sigma 10^{0,1 L_{Ri}}, \text{ дБ,}$$

де  $L_{Ri}$  - величини абсолютних значень кожного з рівнів звукового тиску, що складаються, дБ.

Також сумарний рівень можна визначити, використовуючи графік (рис. 2.6). Знаючи різницю між двома рівнями, дБ, що підсумовуються, за ним визначають додаток  $\Delta L$  до найбільшого з рівнів.

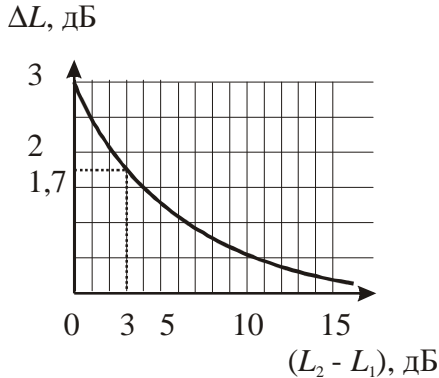


Рис. 2.6 – Вирахування сумарної дії шуму від декількох джерел

Наприклад, необхідно знайти сумарний рівень для двох рівнів, що складаються:  $L_1 = 90$  дБ,  $L_2 = 93$  дБ. Використовуючи рис 2.6, визначаємо різницю між  $L_1$  та  $L_2$ . Різниця рівнів, що складаються  $L_2 - L_1 = 3$  дБ, додаток до найбільшого рівня  $\Delta L = 1,7$  дБ. Тоді  $L_{\Sigma} = L_2 + \Delta L = 93 + 1,7 = 94,7$  дБ.

**Частотні характеристики звуку** визначають спектральний склад коливань, - що для звукової хвилі, наприклад, виливається в суб'єктивне відчуття тембру звучання (і його відтінків). Окрім амплітудних характеристик, значну роль в описі звуку відіграють так звані частотні характеристики звуку. Частота - це кількість коливань в одиницю часу, тобто 1 Гц являє собою 1 коливання в секунду.

Частота коливань  $f$ , Гц, являє собою величину, зворотну періоду коливань:

$$f = 1/T, \text{ Гц,}$$

де  $T$  – період коливань, (тобто час, за який відбувається 1 окремо узятє коливання), с.

Таким чином, частота ув'язана з часом. Тим часом, в

одній хвилі, як правило, одночасно представлені коливання різних частот, кожне з яких має свою амплітуду, - що дозволяє побудувати так називаний спектр: (залежність АЧХ від частоти), - до того ж безперестанно мінливий у часі. Частотні характеристики визначають спектральний склад коливань, - що для звукової хвилі, наприклад, виливається в суб'єктивне відчуття тембру звучання (і його відтінків).

Звукова хвиля являє собою сукупність різночастотних коливань на певних частотах. Наприклад, неодмінно в ній присутній так званий броунівський рух часток пружного середовища, неупорядкований рух дрібних часток в газі або рідині, але частоти броунівського руху молекул повітря лежать за межами чутного для Людини (за частотою) діапазону звуків (див. главу 1.5 монографії "На шляху до наукових відкриттів" [85]), і тому вони ніяк не відбиваються на сприйнятті мовної та іншої інформації. Діапазон чутних для Людини звуків лежить в межах  $20 \text{ Гц} < f < 20000 \text{ Гц}$ .

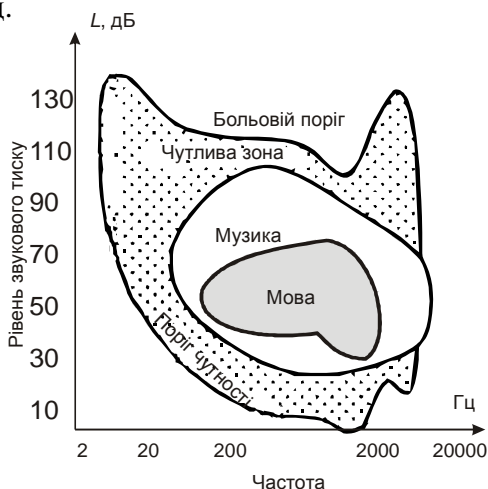


Рис 2.7 – Діапазон слухового сприйняття людини

Звуки із наднизькою частотою  $f < 20$  Гц називаються інфразвуками; звуки із надвисокою частотою  $f > 20000$  Гц - ультразвуками. Людина в силу особливостей побудови органів слуху не може чути ні ультразвук, ні інфразвук.

Різні тварини, на відміну від людини, в силу притаманної їм конституції тіла мають інші діапазони чутних звуків (рис. 2.8).

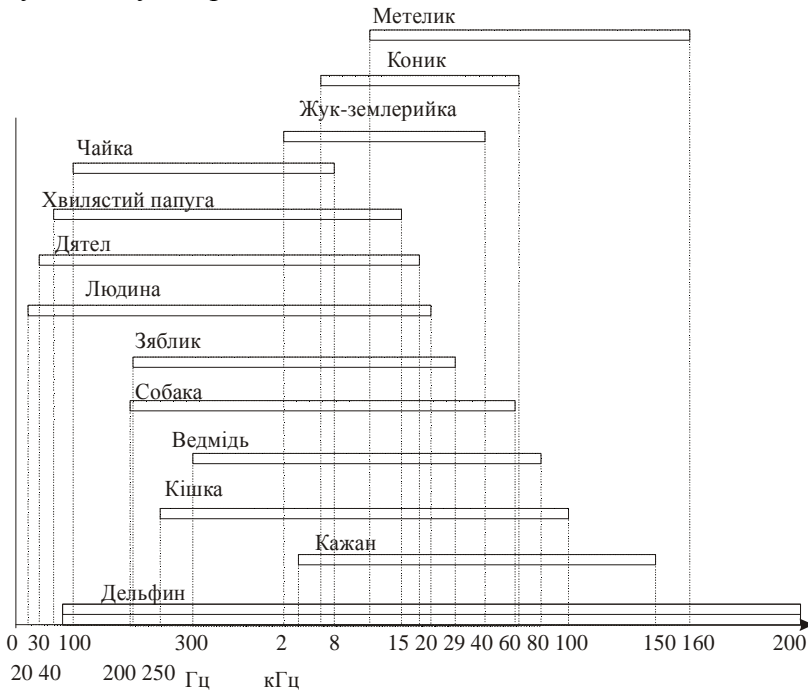


Рис. 2.8 – Чутні діапазони звуку для різних тварин (згідно за даними [84])

Частота тону пов'язана з особливим слуховим відчуттям, яке означають як висоту тону. Якщо частота тону міняється у визначеному відношенні, то цьому відповідає відчуття приросту (чи зменшення) висоти тону на певну величину - інтервал. Так, інтервали частот, що



мають відношення 2:1, відчуються як рівні, в якій би області не лежали відповідні тони; цей інтервал 2:1 носить назву *октави*. Інтервал  $3/2$  носить назву *квінта*;  $5/4$  – *велика терція*;  $6/5$  – *мала терція*;  $4/3$  – *кварта*;  $8/5$  – *мала секста*;  $6/3$  – *велика секста*;  $9/8$  – *велика секунда*,  $25/24$  – *напівтон*, або *дієз*;  $9/5$  – *мала септима*. Ряд тонів, складений з інтервалів, : 1;  $9/8$ ;  $6/5$ ;  $4/3$ ;  $3/2$ ,  $5/3$ ;  $15/8$ ; 2 носить назву *мажорної натуральної гамми*; ряд тонів 1;  $9/8$ ;  $6/5$ ;  $4/3$ ;  $3/2$ ;  $8/5$ ;  $9/5$ ; 2 називається *мінорною натуральною гаммою*. Ці послідовності тонів сприймаються вухом як однакові, на якій би висоті вони не лежали.

Тони мажорної гамми носять назву: *c, d, e, f, g, a, h* або відповідно: *do (ut), re, mi, fa, so, la, si*. Чим менше цілі числа, якими виражається відношення частот тонів інтервалів, тим більше цілісно (зливо) і спокійно звучить співзвуччя таких тонів; такі інтервали носять назву *консонансів*; інтервали, які не можуть бути виражені стосунками малих цілих чисел, звучать неспокійно, шорстко і називаються *дисонансами*. У музичній практиці користуються зазвичай не чистою, а темперованою гаммою, де натуральні інтервали відтворюються лише приблизно. Темперований півтон визначається як  $1/12$  частини октави або 83,3 міліоктав, тобто тони цього інтервалу мають відношення частот

$$\sqrt[12]{2} : 1 = 1,0595.$$

Цілий темперований тон буде дорівнювати

$$\sqrt[2]{2} : 1 = 1,122;$$

консонанси звучать в темперованій гаммі гірше, ніж в натуральній (не так чисто і зливо), оскільки відношення чисел коливань вже не відповідає точно цілим числам,

наприклад, велика терція виразиться числом 1,26 замість  $5/4 = 1,25$ .

Мінімальна тривалість звуку, необхідна для сприйняття висоти тону, і відповідне їй число коливань звуку різні на різних висотах. При швидких трелях або перериваннях тону перерви врешті-решт перестають відчуватися вухом. Для трелі, з двох близьких тонів при частоті трелі більшої 10 разів в секунду (5 разів кожен тон), виходить злиття тонів, при такій же приблизно частоті перестають помічатися перерви звучання одного тону або шуму.

При одночасному звучанні двох і більше сильних тонів вухо відчуває не лише ці впливаючі тони, але і цілий ряд додаткових тонів, званих комбінаційними; при звучанні поодинокого сильного тону вухо також сприймає його не в чистому вигляді, а з додаванням ряду суб'єктивних обертонів. Виникнення цих спотворень слід шукати в тому, що в ющі ми маємо справу з пружними органами, які не підкоряються закону Гуку, оскільки їх пружність неоднакова при відхиленнях в різні боки і зростає не пропорційно діючій силі. Якщо два первинні тони мають частоти  $f_1$  і  $f_2$ , то частоти комбінаційних тонів виражатимуться формулою:

$$F = nf_1 \pm mf_2,$$

де  $n$  й  $m$  – цілі числа; найбільш сильний зазвичай тон  $f_1 - f_2$  (різницевий тон першого порядку), а також іноді тон, число коливань якого  $f$  є загальним найбільшим дільником  $f_1$  і  $f_2$ , усі тони, що виражаються приведеною формулою, а також і первинні тони є гармоніками тону  $F$ . Комбінаційні тони, для яких  $n + m = 2$ , називаються тонами першого порядку; якщо  $n + m = 3$ , то ми маємо тони другого

порядку і т. д. У разі звучання трьох або більш за тони, числа коливань яких відносяться як ряд невеликих послідовних цілих чисел, комбінаційний тон з частотою, рівною загальному найбільшому дільникові, і його перші гармоніки утворюються надзвичайно сильно і усе співзвуччя набуває характеру складного тону з рядом обертонів. У разі виключення із складу складного звуку основних тонів, що несуть означає, долю усієї енергії, тембр звуку майже не змінюється, оскільки вухо заповнює через свої нелінійні властивості тони, яких не вистачає. З цієї причини відрізання низьких частот до 200 Гц дуже мало спотворює передачу по радіо і телефону. Нелінійні властивості вуха характеризуються в найбільш простій формі виникненням суб'єктивних обертонів. На рис. 2.9 дана сила суб'єктивних обертонів (визначена методом маскування), що виникають при дії чистого тону різної сили (на рис. 2.9 це перша гармоніка). Рівні інтенсивності відлічуються від нульового рівня.

Ці дані придатні для тонів усіх висот, оскільки сила обертонів є функцією лише сили впливаючого тону, але не його рівня відчуття. Для тонів, що лежать нижче 60 дБ, гармоніки вже не виникають. Для низьких тонів (нижче 60 Гц) навіть на порозі чутності утворюються сильні гармоніки; рівень відчуття другої гармоніки виявляється завжди вище, ніж основного тону, тобто октава починає чути раніше, ніж основний тон.

Це примушує припускати, що низькі тони взагалі не сприймаються як такі, а відчуються лише за рахунок своїх гармонік. Швидше зростання гучності низьких тонів (в порівнянні з високими) із збільшенням рівня відчуття обумовлене утворенням сильних гармонік, які збуджують

велику площу основної мембрани, що дає додатковий приріст гучності.

Отже, чутний для людини звук буде характеризуватися якимсь графіком АЧХ (залежністю рівнів звукового тиску від частоти на різних частотах), що називається *спектром звуку*. В залежності від форми графіку розрізняють лінійчатий спектр (приклад - сирена), та ін.

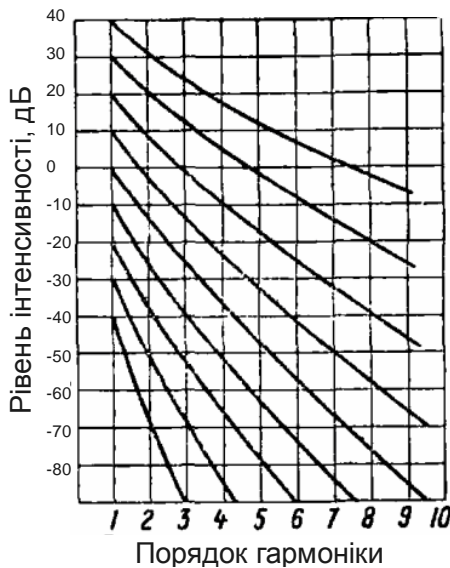
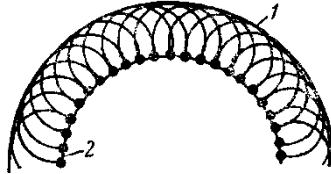


Рис. 2.9 – Обертони на різних гармоніках

**Просторові характеристики** визначають розподіл енергії в просторі хвилею, що розповсюджується: геофізичні координати збурювання, що переноситься даною хвилею, його конкретні геометричні параметри, просторову конфігурацію.

Основним принципом, що описує поширення хвиль, є так званий принцип Гюйгенса-Френеля: кожна точка простору, який досягла в даний момент хвиля, що поширюється, стає джерелом елементарних сферичних

хвиль. Результат інтерференції цих хвиль – поверхня елементарних сферичних хвиль, що обгинає, яка утворює хвильову поверхню.



*Рис. 2.10 – Фронт хвилі, що, наприклад, спостерігається при дифракції (крива 1) – як результат додавання цих вторинних хвиль, що надходять від джерела хвильового збурювання (крива 2)*

Ключовим поняттям при цьому виступає фронт хвилі: тобто сумарна поверхня, що оточує джерело випромінювання, утворене точками, що знаходяться в однакових фазах. Варто мати на увазі, що така уявлювана поверхня, (яка може бути побудована графічно на базі відомих класичних закономірностей), і реальна для тієї ж хвилі, - (з урахуванням того, що вона поширюється в повітрі чи якому-небудь іншій середовищі, переходить з одного середовища в іншу і т.п.), - у дійсності, як правило, дуже сильно розрізняються між собою [86]. Ці перекручування і корективи визначаються, у першу чергу, характеристиками середовища поширення хвилі, що дуже сильно впливають на форму фронту, ослаблення амплітуди хвилі, і ін.

**Тимчасові характеристики** визначають розподіл коливань у часі, тривалість звукових імпульсів, і ін.

За тимчасовими характеристиками шум поділяють:

- на постійний, рівень звуку якого за 8-годинний робочий день змінюється в часу не більше ніж на 5 дБА;
- непостійний, рівень звуку якого за 8-годинний робочий день змінюється в часу більш ніж на 5 дБА;

*Непостійний шум поділяють:*

- на коливний у часі, рівень звуку якого безупинно змінюється в часі;
- переривчастий, рівень звуку якого східчасто змінюється (на 5 дБ і більше), причому тривалість інтервалів, протягом яких рівень залишається постійним, складає 1с і більше;
- імпульсний, що складається з одного або декількох звукових сигналів, кожний тривалістю менше 1с, при цьому рівні звука, вимірюванні в децибелах А відповідно на тимчасових характеристиках "Імпульс" і "Повільно" шумоміра, відрізняються не менше ніж на 7 дБ.

**Характеристики середовища розповсюдження** відіграють найважливішу роль при акустичних процесах, оскільки, як вже говорилося вище, звукові хвилі можуть розповсюджуватися тільки в пружному середовищі. (Вакуум, наприклад, не є пружним середовищем, і звукові хвилі в ньому не розповсюджуються). Найважливішою з таких характеристик є хвильовий опір. Далі ми надаємо пряму цитату з [87]: «Волновое сопротивление в акустике, в газообразной или жидкой среде — отношение звукового давления  $p$  в бегущей плоской волне к скорости  $v$  колебания частиц среды. В. с. характеризует степень жёсткости среды (т. е. способность среды сопротивляться образованию деформаций) в режиме бегущей волны. В. с. не зависит от формы волны и выражается формулой:  $p/v = \rho c$ , где  $\rho$  — плотность среды,  $c$  — скорость звука. В. с. представляет собой импеданс акустический среды для плоских волн. Термин «В. с.» введён по аналогии с В. с. в теории электрических линий; при этом давление соответствует напряжению, а скорость смещения частиц

— электрическому току. В. с. — важнейшая характеристика среды, определяющая условия отражения и преломления волн на её границе. При нормальном падении плоской волны на плоскую границу раздела двух сред коэффициент отражения определяется только отношением В. с. этих сред; если В. с. сред равны, то волна проходит границу без отражения. Понятием В. с. можно пользоваться и для твёрдого тела (для продольных и поперечных упругих волн в неограниченном твёрдом теле и для продольных волн в стержне), определяя В. с. как отношение соответствующего механического напряжения, взятого с обратным знаком, к скорости частиц среды.»

Швидкість поширення звуку  $c$  залежить від характеристик середовища:

$$c = X / \rho, \text{ м/с}$$

де  $\rho$  - щільність середовища поширення,  $\text{кг/м}^3$ ;  $X$  - характеристика стискальності середовища, Па: (рис. 2.11)

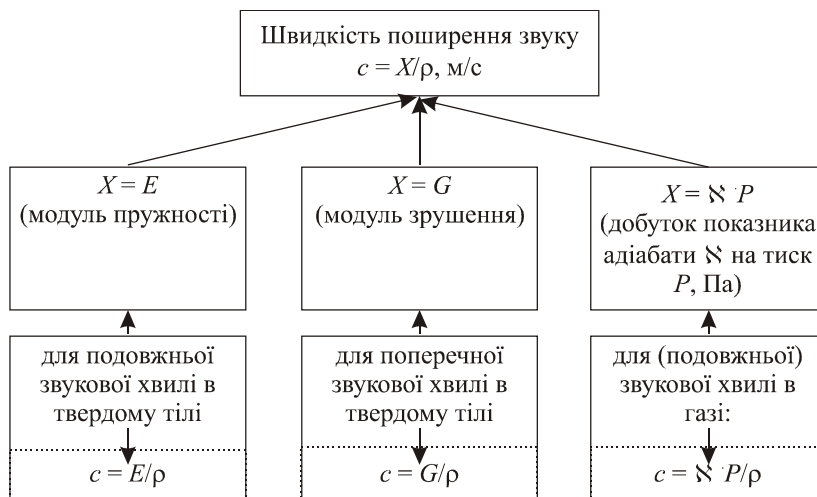


Рис. 2.11 –  $X$  - характеристика стискальності середовища для різних типів хвиль, та формули визначення швидкості звуку  $c$ , м/с

Усі групи хвильових характеристик дуже тісно зв'язані між собою. Наприклад, поширення хвилі в просторі супроводжується невинним розширенням її фронту, - що, як більш докладно показано далі, - приводить до перерозподілу енергії по його поверхні, яка постійно збільшується, - і, в остаточному підсумку, забезпечує безперестанне ослаблення інтенсивності коливань (розсіювання).

Якщо аналізувати графіки АЧХ хвилі, явно видно, що в той же самий момент часу та ж сама хвиля в одній і тій же точці має безліч фронтів, кожний для своєї дискретної частоти, що розрізняються між собою фразами коливань, а однакову фазу вона має відповідно до графіка гіперболічної залежності:

$$T = \frac{R}{c} = \frac{R}{\lambda f}, \text{ с,}$$

де  $R$  - відстань, м, пройдена хвилею, що має довжину хвилі  $\lambda$ , м, і частоту  $f$ , Гц, за час  $T$ , с: ( $c$  – швидкість розповсюдження звуку). Тут взаємопов'язані тимчасові, просторові, частотні характеристики одночасно.

Зменшення амплітуди хвилі ув'язано і з характеристиками її середовища поширення: явище поглинання енергії в середовищі, (яке залежить від її фізико-хімічного складу й ін.).

Ось як говорить про «гучність звуку» [88]: «Громкость звука, величина, характеризующая слуховое ощущение для данного звука. Г. з. сложным образом зависит от звукового давления (или интенсивности звука), частоты и формы колебаний. При неизменной частоте и форме колебаний Г. з. растет с увеличением звукового давления (см. рис.).



При однаковому звуковому тиску Г. з. чистих тонів (гармонічних коливань) різної частоти різні, т. є. на різних частотах однакову гучність можуть мати звуки різної інтенсивності. Г. з. даної частоти оцінюють, порівнюючи її з гучністю простого тону частотою 1000 Гц. Рівень звукового тиску (в дБ) чистого тону з частотою 1000 Гц, стільки ж гучного (порівнянням на слух), як і вимірюваний звук, називається рівнем гучності даного звуку (в фонах). Г. з. для складних звуків оцінюють за умовною шкалою в сонах. Г. з. є важливою характеристикою музичного звуку...»

При незмінній частоті гучність звуку зростає з збільшенням інтенсивності. При однаковій інтенсивності найбільшою гучністю володіють звуки в діапазоні частот 700 - 6000 Гц. Нульовий рівень гучності звуку відповідає звуковому тиску 20 мкПа й інтенсивності звуку  $10^{-12}$  Вт/м<sup>2</sup> при частоті 1 кГц. Вимірюється звучність в сонах і фонах. Фон, є одиницею рівня гучності звуку. Для чистого тону 1 фон збігається з 1 дБ. Сон (від лат. sonus - звук), одиниця шкали гучності звуку, що виражає безпосередню суб'єктивну оцінку порівняльної гучності чистого тону. 1 сон відповідає рівню гучності 40 фон при частоті звуку 1000 Гц. При кожному збільшенні гучності на 10 фон число одиниць сонів приблизно подвоюється.

Також надаємо ілюстрацію, що надає вищезгадану умовну шкалу, відградувану в сонах, в залежності від рівня звукового тиску та частоти:

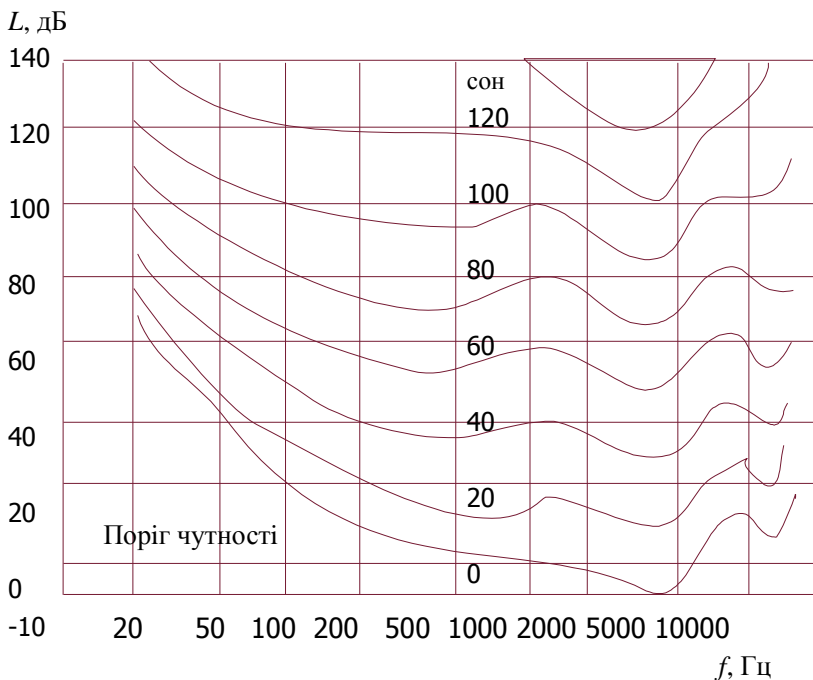


Рис. 2.12 – Криві рівної голосності

Спроба об'єднати вплив тих чи інших хвильових характеристик на характер протікання різноманітних хвильових явищ в літературних джерелах не зустрічається. Вона надана автором в роботі [85].

### 2.3. Вимірювання рівнів шуму

Для вимірювання рівнів шуму застосовуються шумоміри, основними елементами яких є: мікрофон, що перетворює звукові коливання повітряного середовища на електричні, підсилювач та стрілочний або цифровий індикатор [89].

Спектральний аналіз шуму може здійснюватися і за допомогою вимірювального тракту, який складається з мікрофона, шумоміра та аналізатора шуму (фільтра).

Приклад одного шумомірів - пристрій ВШВ-003

показаний на наступному кресленні (рис. 2.13).

Вимірювання рівнів звука в децибелах А на характеристиці А передбачає, що кнопки "V", "I кГц" і "ФІЛЬТРИ ОКТАВНІ" повинні бути відключені, тобто знаходитися у віджатому стані; роблять вимір рівня звуку поступово, спочатку перемикачем "ДЕЛИТЕЛЬ I", а потім "ДЕЛИТЕЛЬ II", виводячи стрілку приладу в сектор 0–10 дБ. Для зручності можна використовувати світлове табло, що фіксує суму положень перемикачів "ДЕЛИТЕЛЬ I" і "ДЕЛИТЕЛЬ II" навпроти світлодіоду. Для одержання результату виміру слід скласти показання світлодіоду і вимірювальної шкали на передній панелі приладу. Якщо періодично загоряється індикатор "ПЕРЕГРУЗ", необхідно переключити "ДЕЛИТЕЛЬ" на рівень вище. Вимірювання рівня звукового тиску в октавних смугах частот проводять при натиснутій кнопці "ФІЛЬТРИ ОКТАВНІ". Переключаючи перемикач, включають по черзі середньгеометричні частоти 31,5; 63; 125; 250; 500; 1000; 2000; 4000; 8000 Гц, установлюючи щоразу перемикач "ДЕЛИТЕЛЬ I" і "ДЕЛИТЕЛЬ II" у положення, при якому стрілка вимірювального приладу займає положення 0 – 10. При цьому відлік здійснюється аналогічно виміру рівня звуку.

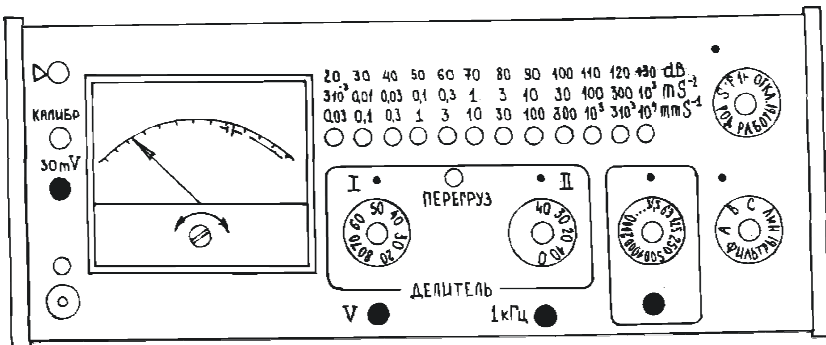


Рис. 2.13 – Загальний вигляд вимірювача шуму та вібрації ВШВ-003

Вимірювання звукоізолюючої акустичної ефективності матеріалів (тобто їхньої звукоізолюючої здатності) можуть бути здійснені на лабораторному стенді, що показаний на рис. 2.14.

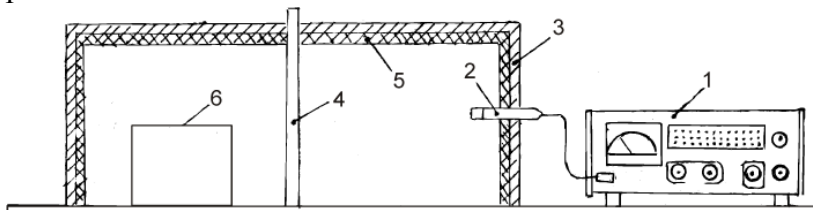


Рис. 2.14 – Лабораторний стенд: 1 - шумомір ВШВ - 003, 2 - мікрофонний капсульт М – 101, 3 - звукоізолюючий кожух, 4 - зразок досліджуваної конструкції (панелі), 5 - звуковбирний матеріал, 6 - джерело шуму

Акустичні випробування приміщень засновані на електричних вимірах звукового сигналу, прийнятого в приміщенні мікрофоном, і полягають у визначенні рівномірності розподілу звуку в просторі й у дослідженні загасання відзвуку в часі. Поряд з випробуваннями залів у натурі все більше поширення знаходять випробування малих моделей, що дозволяє вчасно уникнути помилок при проектуванні нових залів і знаходити способи виправлення дефектів уже існуючих.

Час реверберації вимірюють, записуючи процес убутання рівня звуку після вимикання його джерела; для цього застосовуються самописи з логарифмічною шкалою. Час реверберації визначається за середнім нахилом записаної на стрічці рівнеграми.

Визначення коефіцієнта поглинання  $\alpha$  здійснюють на підставі відомих формул Себіна та Ейрінга [90, 91], про які буде докладніше розказано пізніше. Коефіцієнти поглинання різних матеріалів визначають вимірами в "гучній" (ревербераційної) камері. Позначимо обсяг

камери через  $V$ ,  $\text{м}^3$  а її час реверберації через  $T_0$ , с. Після внесення в камеру досліджуваного матеріалу із площею  $S_M$ ,  $\text{м}^2$  час реверберації зменшується до  $T_M$ . Тоді:

$$\alpha = \frac{1}{6} \cdot \frac{V}{S_M} \cdot \left[ \frac{1}{T_M} - \frac{1}{T_0} \right]$$

Якщо площа досліджуваного предмета (наприклад, стола, крісла й т.д. ) не може бути виражена певним числом, знаходять поглинання предмета

$$A = \frac{V}{6} \cdot \left[ \frac{1}{T_M} - \frac{1}{T_0} \right].$$

Докладно про акустичні виміри можна дізнатися, наприклад, в [92 - 93], а про вимірювальну апаратуру для них – в [94].

## **2.4. Нормовані характеристики звуку**

Контроль за рівнями шуму та його оцінка здійснюються згідно з ДСН № 3.3.6.037-99, та ГОСТ 12.1.050-86; ГОСТ 12.1.003-83\*; ДСТУ 2867-94 [4, 5, 6, 95].

На робочих місцях згідно з ГОСТ 12.1.003-83 шум характеризують рівні звукового тиску в октавних середньгеометричних смугах частот: 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 та 8000 Гц. Для орієнтовної оцінки допускається брати рівні звуку за шкалою А (у дБА). Характеристика непостійного шуму на робочих місцях — еквівалентний рівень звуку. На рис. 2.15 надано нормативні рівні звукового тиску та рівні звуку на постійних робочих місцях («Санітарні норми виробничого звуку, ультразвуку та інфразвуку» ДСН 3.3.6.037-99) у графічному вигляді (тобто спектри).

В Україні й Росії діють різні нормативні документи відносно шуму на міських територіях. Сам по собі підхід

до нормування однаковий (і виходить із радянських СНиП II-12-77 [18] і ГОСТ 12.1.003-83\* [11]). Однак у Росії діє новий нормативний документ СНиП 23-03-2003 [96]; в Україні по колишньому діють згадані [18] й [11], доповнені українськими ДСН 3.3.6.037-99 [17] (але «державні санітарні норми» [17] нормують виробничий шум і для території міста підходять лише почасти).

У кожному разі, нормуванню підлягають ті самі параметри - рівень звуку, дБА, і рівні звукового тиску в октавних смугах частот (а також еквівалентні рівні). Розрізняються чисельні значення даних рівнів, притім досить незначно. Норми СНиП II-12-77 [18] трохи складніше в застосуванні, ніж норми СНиП 23-03-2003 [96] за рахунок виправлень на час доби, місце розташування об'єкта й ін.

Нормованими параметрами постійного шуму в розрахункових точках за [18] слід рахувати рівні звукового тиску  $L$  в дБ в октавних смугах частот із середньгеометричними частотами 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 і 8000 Гц; шуму, що коливається в часі - еквівалентні (по енергії) рівні звуку  $L_{A \text{ экв}}$  у дБА; переривчастого і імпульсного шуму - слід рахувати еквівалентні (по енергії) рівні звукового тиску у дБ в октавних смугах частот з середньгеометричними частотами 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 і 8000 Гц.

Допустимі рівні звукового тиску (еквівалентні рівні звукового тиску) в дБ в октавних смугах частот, рівні звуку і еквівалентні рівні звуку в дБА для житлових і громадських будівель і їх території слід приймати відповідно до таблиці. 1 [18], з поправками до них відповідно до таблиці 2.1 [18].

Табл. 2.1 - Нормативні значення рівнів звуку й звукового тиску для житлових і громадських будівель і їх території (Таблица 1 [18])

№ з/п	Рівні звукового тиску $L$ (еквівалентні рівні звукового тиску $L_{\text{экв}}$ ) у дБ в октавних смугах частот з середньгеометричними частотами в Гц								Рівні звуку $L_A$ й еквівалентні рівні $L_{A\text{экв}}$
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	в дБА
1.	51	39	31	24	20	17	14	13	25
2.	55	44	35	29	25	22	20	18	30
3.	59	48	40	34	30	27	25	23	35
4.	59	48	40	34	30	27	25	23	35
5.	67	57	49	44	40	37	35	33	45
6.	63	52	45	39	35	32	30	28	40
7.	71	61	54	49	45	42	40	38	50
8.	75	66	59	54	50	47	45	43	55
9.	79	70	63	58	55	52	50	49	60

Пояснення до табл. 2.1

1. Палати лікарень і санаторіїв, операційні лікарень
2. Житлові кімнати квартир, житла будинків відпочинку і пансіонатів, спальні приміщення в дитячих дошкільних установах і школах - інтернатах
3. Кабінети лікарів лікарень, санаторіїв, поліклінік, зали для глядачів концертних залів, номери готелів, житлові кімнати в гуртожитках
4. Території лікарень, санаторіїв, безпосередньо прилеглі до будівлі
5. Території, безпосередньо прилеглі до житлових будинків (у 2 м від конструкцій, що огорожують), майданчики відпочинку мікрорайонів і груп житлових будинків, майданчики дитячих дошкільних установ, ділянки шкіл
6. Класні приміщення, учбові кабінети, аудиторії шкіл і інших учбових закладів, конференц-зали, читальні зали, зали для глядачів театрів, клубів, кінотеатрів, зали судових засідань і нарад
7. Робочі приміщення управлінь, робочі приміщення конструкторських, проектних організацій і науково-дослідних інститутів
8. Зали кафе, ресторанів, їдалень, фойє театрів і кінотеатрів

9. Торговельні зали магазинів, спортивні зали, пасажирські зали аерофлотів і вокзалів, приймальні пункти підприємств громадського обслуговування

### Примітки [18]:

1. Рівні звукового тиску в октавних смугах частот в дБ, рівні звуку і еквівалентні рівні звуку в дБА для шуму, що створюється системами кондиціонування повітря, повітряного опалювання і вентиляції, в приміщеннях і на територіях, прилеглих до будівель, слід приймати на 5 дБ нижче (поправка  $\Delta_n = -5$  дБ) вказаних в таблиці 1.1 або фактичних рівнів шуму в приміщеннях в робочий час, якщо останні не перевищують значень, вказаних в справжній таблиці (поправку для тонального шуму по таблиці. 2 в цьому випадку приймати не слід).

2. Еквівалентні рівні звуку в дБА для шуму, створюваного засобами транспорту (автомобільного, залізничного, повітря) в 2 м від конструкцій будівель, обернених у бік джерел шуму, що огорожують, допускається приймати на 10 дБА вище (поправка  $\Delta_n = +10$  дБА) рівнів звуку, вказаних в поз. 5 таблиці 2.1.

*Табл. 2.2 – Поправки до нормативних рівнів (Таблиця 2 [18])*

Впливаючий чинник	Умови	Поправка в дБ або дБА
Характер шуму	Широкополосовий шум	0
	Тональний або імпульсний шум	-5
Місце розташування об'єкту	Курортний район	-5
	Новий проєктований міський житловий район	0
	Житлова забудова, що розташована у існуючій забудові (що склалася)	+5
Час доби	День –с 7 до 23 годин	+10
	Ніч –с 23 до 7 годин	0

### Примітки [18]:

1. Поправки на час доби вносяться при визначенні допустимих рівнів звукового тиску і рівнів звуку для житлових кімнат квартир, спальних приміщень будинків відпочинку і пансіонатів, спальних приміщень в дитячих дошкільних установах і школах-інтернатах,



палат лікарень і спальних кімнат санаторіїв, житлових кімнат гуртожитків, номерів готелів, для територій, безпосередньо прилеглих до житлових будинків, територій лікарень, санаторіїв, безпосередньо прилеглих до будівель.

2. Поправки на місце розташування об'єкту слід враховувати тільки для зовнішніх джерел шуму при визначенні допустимих рівнів звукового тиску і рівнів звуку для житлових кімнат квартир, спальних приміщень будинків відпочинку і пансіонатів, спальних приміщень в дитячих дошкільних установах і школах-інтернатах, палат лікарень і спальних кімнат санаторіїв, житлових кімнат гуртожитків, номерів готелів.

3. Поправку на місце розташування об'єкту не слід застосовувати для будівель, що знову будуються, в існуючій забудові (що склалася).

У загальному випадку, з урахуванням виправлень на час проведення вимірів, місце розташування об'єкта й ін., рівень звуку на території міста не повинен перевищувати значення 45-65 дБА (варіюється для різних умов), а рівні звукового тиску в октавних смугах частот - не повинен виходити за межі відповідних нормативних спектрів.

На робочих місцях промислових підприємств згідно з ГОСТ 12.1.003-83 шум характеризують рівні звукового тиску в октавних середньгеометричних смугах частот: 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 та 8000 Гц. Для орієнтовної оцінки допускається брати рівні звуку за шкалою А (у дБА).

Про вищезгадану шкалу А слід пояснити окремо.

Відносно простим завданням електроніки і виміральної техніки є побудова спеціальної електронної схеми, чутливість якої змінюється з частотою згідно з частотними змінами чутливості людського слуху. Нині широко застосовуються визначувані міжнародними рекомендаціями і стандартами схеми частотної корекції, позначені "А", "В" і "С".

Характеристика схеми "А", що коригує, відповідає

кривим рівної гучності в області низьких рівнів звукового тиску, схема "В" являється наближенням в області середніх рівнів звукового тиску, а параметри схеми "С" відповідають кривим рівної гучності в області високих рівнів звукового тиску.

Проте в більшості практичних областей віддається перевага схемі частотної корекції "А" зважаючи на відносно поганій кореляції між результатами суб'єктивних експериментів і об'єктивних вимірів приладами з схемами частотної корекції "В" і "С". Слід зазначити, що нині є додаткова схема частотної корекції "D", визначувана міжнародними рекомендаціями і стандартами і призначена для вимірів шуму літаків (рис. 2.16).

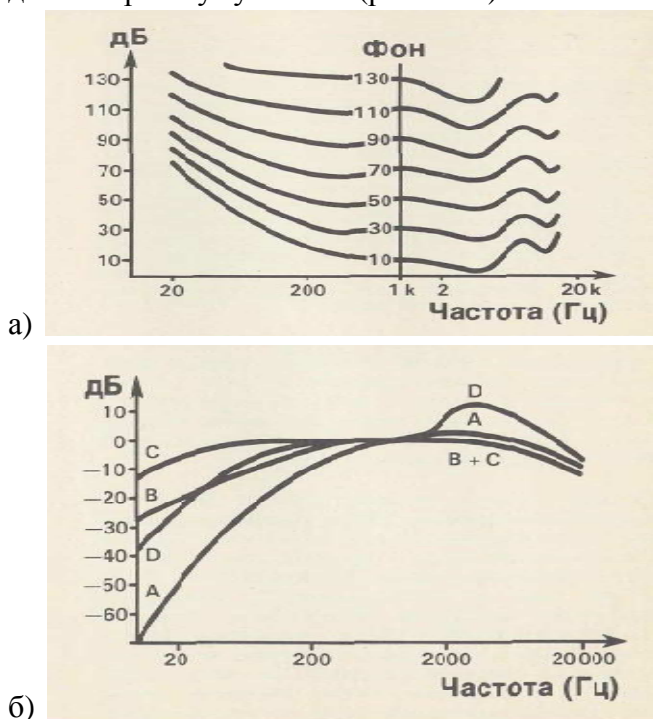


Рис. 2.16 - Схеми частотної корекції

Характеристика непостійного шуму на робочих місцях — еквівалентний рівень звуку. На рис. 2.17 надано нормативні рівні звукового тиску та рівні звуку на постійних робочих місцях («Санітарні норми виробничого звуку, ультразвуку та інфразвуку» ДСН 3.3.6.037-99) у графічному вигляді (тобто спектри).

Виявлено, що вплив шуму збільшується із збільшенням рівнів шуму; із збільшенням частоти шуму (тобто високочастотний шум більш неприємний, ніж низькочастотний (що стверджується також санітарним нормуванням [4, 5, 6, 95])), а також із звуженням ширини смуги частот, на якій знаходиться максимум енергії, що випромінюється.

*Табл. 2.3 - Нормативні спектри шуму (рівні звуку та звукового тиску згідно ДСН 3.3.6.037-99 для різних видів діяльності):*

№ п/п	Рівні звукового тиску в дБ в октавних смугах з середньгеометричними частотами, Гц									Рівні шуму та еквівалентні рівні шуму, дБА, дБА <sub>екв.</sub>
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
1.	86	71	61	54	49	45	42	40	38	50
2.	93	79	70	63	58	55	52	50	49	60
3.	96	83	74	68	63	60	57	55	54	65
4.	103	91	83	77	73	70	68	66	64	75
5.	107	95	87	82	78	75	73	71	69	80

### Пояснення до табл. 2.3

1. Творча діяльність, керівна робота з підвищеними вимогами, наукова діяльність, конструювання та проектування, програмування, викладання та навчання, лікарська діяльність; робочі місця у приміщеннях – дирекції, проектно-конструкторських бюро, розраховувачів, програмістів обчислювальних машин, у лабораторіях для теоретичних робіт та обробки даних, прийому хворих у

медпунктах (рівень звукового тиску, дБ); 1А. Те ж, рівень звуку в дБА (=50 дБА).

2. Високкокваліфікована робота, що вимагає зосередження, адміністративно-керівна діяльність, вимірювальні та аналітичні роботи у лабораторії; робочі місця в приміщеннях цехового керівного апарату, контор, лабораторій; 2А. Те ж, рівень звуку в дБА (= 60 дБА).

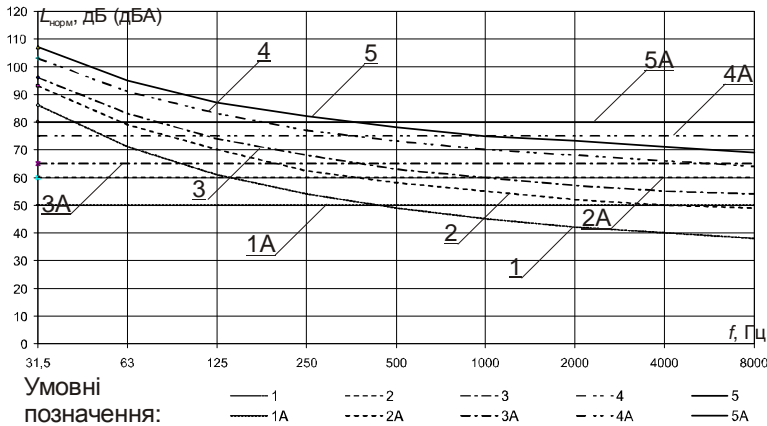
3. Робота, що виконується з вказівками та акустичними сигналами, які часто надходять; робота, що потребує постійного слухового контролю, операторська робота за точним графіком з інструкцією, диспетчерська робота: робочі місця у приміщеннях диспетчерської служби, кабінетах та приміщеннях спостереження та дистанційного керування з мовним зв'язком по телефону, друкарських бюро, на дільницях точного складання, на телефонних та телеграфних станціях, у приміщеннях майстрів, у залах обробки інформації на обчислювальних машинах без дисплея та у приміщеннях операторів акустиків; 3А. Те ж, рівень звуку в дБА (=65 дБА).

4. Робота, що вимагає зосередження, робота з підвищеними вимогами до процесів спостереження та дистанційного керування виробничими циклами: робочі місця за пультами у кабінетах нагляду та дистанційного керування без мовного зв'язку по телефону; у приміщеннях лабораторій з шумовим устаткуванням, шумними агрегатами обчислювальних машин. 4А. Те ж, рівень звуку в дБА (= 75 дБА).

5. Виконання всіх видів робіт (крім перелічених у пп. 1-4 та аналогічних їм) на постійних робочих місцях у виробничих приміщеннях та території підприємств. 5А. Те ж, рівень звуку в дБА (= 80 дБА).

Норми враховують біологічну небезпеку тонального та імпульсного шуму, а також категорію фізичного напруження (важкості праці) завдяки введенню відповідних поправок.

Норми враховують біологічну небезпеку тонального та імпульсного шуму, а також категорію фізичного напруження (важкості праці) завдяки введенню відповідних поправок.



*Рис. 2.17 – Нормативні спектри шуму (рівні звуку та звукового тиску згідно ДСН 3.3.6.037-99 для різних видів діяльності):*

1. *Творча діяльність, керівна робота з підвищеними вимогами, наукова діяльність, конструювання та проектування, програмування, викладання та навчання, лікарська діяльність; робочі місця у приміщеннях – дирекції, проектно-конструкторських бюро, розраховувачів, програмістів обчислювальних машин, у лабораторіях для теоретичних робіт та обробки даних, прийому хворих у медпунктах (рівень звукового тиску, дБ); 1А. Те ж, рівень звуку в дБА (=50 дБА).*
2. *Висококваліфікована робота, що вимагає зосередження, адміністративно-керівна діяльність, вимірювальні та аналітичні роботи у лабораторії; робочі місця в приміщеннях цехового керівного апарату, контор, лабораторій; 2А. Те ж, рівень звуку в дБА (= 60 дБА).*
3. *Робота, що виконується з вказівками та акустичними сигналами, які часто надходять; робота, що потребує постійного слухового контролю, операторська робота за точним графіком з інструкцією, диспетчерська робота: робочі місця у приміщеннях диспетчерської служби, кабінетах та приміщеннях спостереження та дистанційного керування з мовним зв'язком по телефону, друкарських бюро, на дільницях точного складання, на телефонних та телеграфних станціях, у приміщеннях майстрів, у залах обробки інформації на обчислювальних машинах без дисплея та у приміщеннях операторів акустиків; 3А. Те ж, рівень звуку в дБА (=65 дБА).*
4. *Робота, що вимагає зосередження, робота з підвищеними вимогами до процесів спостереження та дистанційного керування виробничими циклами: робочі місця за пультами у кабінетах нагляду та дистанційного керування без мовного зв'язку по телефону; у приміщеннях лабораторій з шумовим устаткуванням, шумними агрегатами обчислювальних машин. 4А. Те ж, рівень звуку в дБА (= 75 дБА).*
5. *Виконання всіх видів робіт (крім перелічених у пп. 1-4 та аналогічних їм) на постійних робочих місцях у виробничих приміщеннях та території підприємств. 5А. Те ж, рівень звуку в дБА (= 80 дБА).*

Вимоги до допустимих рівнів ультразвуку на робочих місцях визначаються в «Санітарних нормах виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку» (ДСН 3.3.6.037-99) [97]. Джерелами ультразвуку є виробниче устаткування, в якому генеруються ультразвукові коливання для виконання технологічного процесу, а також обладнання, при використанні якого ультразвук виникає як супровідний фактор. ДСН 3.3.6.037-99 визначає допустимі рівні звукового тиску для робочих місць вимірюваного ультразвуку у третьоктавних смугах із середньгеометричними частотами. Так, для середньгеометричної частоти 12,5 кГц рівень звукового тиску не повинен перевищувати 80 дБ, для 16 кГц - 90 дБ, 20 кГц - 100 дБ, 25 кГц - 105 дБ; для середньгеометричних частот у діапазоні 31,5 - 10 кГц рівні звукового тиску не повинні перевищувати 110 дБ. Загальний рівень звукового тиску не повинен перевищувати 110 дБ.

"Санітарними нормами і правилами при роботі на промислових ультразвукових установках" (№ 1733-77) обмежуються рівні звукового тиску у високочастотній області чутних звуків і ультразвуків на робочих місцях (від 80 до 110 дБ при середньгеометричних частотах третьоктавних смуг від 12,5 до 100 кГц).

Ультразвук, що передається контактним шляхом, нормується "Санітарними нормами і правилами при роботі з устаткуванням, що створює ультразвуки, що передаються контактним шляхом на руки працюючих" № 2282-80.

Вимоги до допустимих рівнів інфразвуку на робочих місцях визначаються в "Санітарних нормах виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку" (ДСН 3.3.6.037-99), де за характером спектру інфразвук підрозділяється на

широкосмуговий і гармонійний. Гармонійний характер спектра встановлюють в октавних смугах частот по перевищенню рівня в одній смузі над сусідніми не менш чим на 10 дБ. По тимчасових характеристиках інфразвук підрозділяється на постійний і непостійний.

Нормованими характеристиками інфразвуку на робочих місцях є рівні звукового тиску в децибелах в октавних смугах частот зі середньгеометричними частотами 2, 4, 8, 16 Гц. ДСН 3.3.6.037-99 визначає допустимі рівні звукового тиску для робочих місць вимірюваного інфразвуку у третьоктавних смугах з середньгеометричними частотами. Так, припустимими рівнями звукового тиску є 105 дБ в октавних смугах 2, 4, 8, 16 Гц і 102 дБ в октавній смузі 31,5 Гц. При цьому загальний рівень звукового тиску не повинний перевищувати 110 дБ.

Для непостійного інфразвуку нормованою характеристикою є загальний рівень звукового тиску.

## **Висновки до розділу 2**

Другий розділ присвячено опису фізичних характеристик звуку та деяких хвильових явищ, що супроводжують його розповсюдження. Наведено нормативні характеристики звуку на території підприємств та житлової забудови та чисельні значення вищевказаних норм.

### 3. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ІНЖЕНЕРНИХ РІШЕНЬ ДЛЯ ОСЛАБЛЕННЯ ІНТЕНСИВНОСТІ ЗВУКУ

#### 3.1. Пошук шляхів розв'язання проблеми

Відомо, ([110]), що звукові хвилі у певних умовах здатні до поляризації. Відповідно до хвильової теорії фізики, поляризація хвиль являє собою порушення осьової симетрії поперечної хвилі щодо її напрямку поширення. Поляризація світла добре відома, і широко використовується в техніці.

Згадаємо, що ж це таке?

Відповідно до закону збереження енергії інтенсивність падаючої хвилі  $I_{\text{падіння}}$ , що попадає на яку-небудь перешкоду, перерозподіляється таким чином:

- частково відбивається  $I_{\text{відбиття}}$ , Вт/м<sup>2</sup>;
- частково поглинається усередині середовища перешкоди  $I_{\text{поглинання}}$ , Вт/м<sup>2</sup>;
- частково проходить наскрізь  $I_{\text{пропущення}}$ , Вт/м<sup>2</sup>;

$$I_{\text{пад}} = I_{\text{відбиття}} + I_{\text{поглинання}} + I_{\text{пропущення}}, \text{ Вт/м}^2 \quad (3.1)$$

Відношення  $I_{\text{відбиття}}$ ,  $I_{\text{поглинання}}$ , і  $I_{\text{пропущення}}$  до  $I_{\text{падіння}}$  відповідно носять назви:

$\rho$  - коефіцієнт відбиття, - (іноді називаний альбедо):

$$\rho = \frac{I_{\text{відбиття}}}{I_{\text{падіння}}}; \quad (3.2)$$

$\alpha$  - коефіцієнт поглинання:

$$\alpha = \frac{I_{\text{поглинання}}}{I_{\text{падіння}}}; \quad (3.3)$$

$\tau$  - коефіцієнт пропущення:

$$\tau = \frac{I_{\text{пропущення}}}{I_{\text{падіння}}}. \quad (3.4)$$



Відповідно, залежність 3.1 (згідно до фундаментальної закономірності матеріального світу – закону збереження енергії) має вид:

$$\alpha + \rho + \tau = 1. \quad (3.5)$$

### 3.2. Відбиття звуку

Явище відбиття звуку полягає в поверненні звукової хвилі при зустрічі з границею розподілу 2-х середовищ з різними щільністю і стискальністю "назад" у перше середовище [98]. Явище відбиття світла має аналогічний характер. Для усіх видів хвиль правомірний закон відбиття: кути падіння  $\varphi$  і відбиття  $\varphi'$  рівні; падаючий, відбитий промінь і перпендикуляр, відновлений у крапці падіння, лежать у 1 площині.

$$\varphi = \varphi' = \text{const.}$$

Ця залежність справедлива як у випадку дзеркального (розміри  $l$  нерівностей на поверхні розподілу менше  $\lambda$ ), так і дифузійного ( $l \geq \lambda$ ) відбиття [99, 100]. При дзеркальному відбитті поверхня, що відбиває світло, невидима; бачимо тільки джерела світлових променів. Кожен окремий промінь, що падає, при дифузійному відображенні підкоряється законам відбиття. Промені, відбиті від ділянок шорсткуватої поверхні, орієнтованих різним чином стосовно падаючого променя, не утворять рівнобіжного пучка після процесу відбиття. Унаслідок цього поверхня, що відбиває, стає видимою.

Для законів відбиття світла виконується принцип оборотності ходу світлових променів: промінь світла, що поширюється за шляхом відбитого променя, відбившись в місці падіння від поверхні тіла, поширюється далі за шляхом променя, що падає [101, с. - 420].

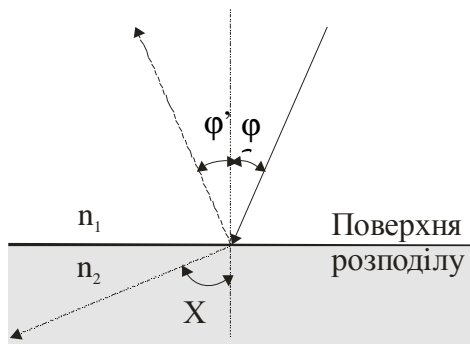


Рис. 3.1 – Шляхи падаючого, відбитого та переломленого променів

Світлові промені, проходячи через границю розподілу двох середовищ з різними показниками переломлення  $n_1$  і  $n_2$ , визнають відбиття і переломлення. Відбитий і переломлений промені виявляються частково лінійно поляризованими. У відбитому світловому промені коливання відбуваються переважно перпендикулярно площини падіння, а в переломленому — у площині падіння (рис. 3.2).

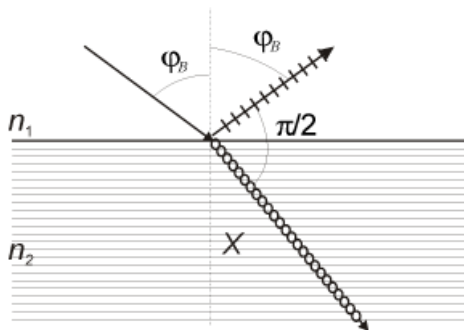


Рис. 3.2 – Поляризація при відбитті світла

Існує такий кут падіння  $\varphi_B$ , називаний кутом Брюстера, при якому відбите світло виявляється цілком лінійно поляризованим. Це явище називається законом Брюстера. Кут Брюстера визначається співвідношенням

$$\operatorname{tg} \varphi_B = n_{12}, \quad (3.6)$$

де  $n_{12} = n_2/n_1$  - показник переломлення середовища, в якому поширюється переломлене світло, щодо середовища, в якому поширюється падаюче світло. При куті Брюстера відбитий та переломлений промені утворюють прямий кут:

$$\varphi_B + \varphi_B = \pi/2.$$

Відбиття під кутом Брюстера являє собою найпростіший спосіб одержання поляризованого світла. Відбите світло лінійно поляризоване так, що коливання його хвилі відбуваються в площині, перпендикулярній площині падіння. Недоліком цього способу одержання поляризованого світла є мала інтенсивність відбитих променів.

Числові значення кута Брюстера:  $\varphi_B = 83^\circ 40'$  для води і  $\varphi_B = 56^\circ 49'$  для скла.

### **3.3. Аналогія до відомого явища обертання площини поляризації світла в додаванні до явищ розповсюдження звуку**

Явище обертання площини поляризації світла впливає з фізики процесу поляризації хвиль, але іноді розглядається як самостійне явище. Являє собою поворот площини поляризації лінійно поляризованого світла при його проходженні через речовину, і спостерігається в оптично активних речовинах, а також у речовинах, поміщених у магнітне поле.

Речовини, що здатні повертати площину поляризації падаючих на них світлових хвиль, називають оптично активними. Оптично активними можуть бути як рідкі

речовини і гази, так і кристали. Кут повороту площини поляризації  $\alpha$  лінійно поляризованої хвилі пропорційний довжині шляху світла в речовині  $l$ . У твердих тілах:

$$\alpha = a \cdot l,$$

де  $a$  - оберտальна здатність, що залежить від роду речовини, його температури і довжини хвилі. У розчинах:

$$\alpha = \frac{a_0 \cdot l \cdot m}{V},$$

де  $a_0$  — пито́ме обертання;

$m$  — маса оптично активної речовини, кг;

$V$  — обсяг розчину, м<sup>3</sup>.

Оптично неактивні речовини під дією магнітного полю здобувають здатність обертати площину поляризації світла, що поширюється уздовж напрямку полю. Це явище називається ефектом Фарадея (1845). Кут повороту площини поляризації:

$$\alpha = V \cdot l \cdot B,$$

де  $V$  — постійна Верде (питоме магнітне обертання),

$B$  — індукція однорідного магнітного полю.

Постійна Верде  $V$  залежить від природи речовини, його температури і довжини світлової хвилі. Магнітне обертання площини поляризації порозумівається асиметрією оптичних властивостей речовини, що виникає під дією магнітного полю.

Розрізняють правий і лівий напрямки обертання площини поляризації з погляду спостерігача, що дивиться назустріч лучу. Вимір кута повороту  $\alpha$  дозволяє визначати концентрації розчинів.

Таким чином, існує базовий матеріал для майбутніх наукових досліджень: якщо є обертання площини

поляризації для світла, - чому ж не припустити, що аналогічне явище можливе і для звуку? Основне завдання при дослідженнях у даному напрямку полягає в тому, щоб виявити такі умови, - (підібрати відповідні сполучення матеріалів), щоб згідно [102], що передбачає поляризацію звукових хвиль, експериментальним шляхом підтвердити існування даного, невідомого раніше (сугубо стосовно до звуку) хвильового явища.

Усе це – досить просто; і, за умови належного експерименту в лабораторних умовах, здатного підтвердити існування даного явища в акустиці, з використанням матеріалів [102], - може зробити справжній переворот в науці!

### **3.4. Повне внутрішнє відбиття хвиль**

У всіх видів хвиль [104] відбиття відбувається при їхньому похилому падінні на границю розподілу 2-х середовищ при переході випромінювання із середовища  $i-1$  з меншою швидкістю поширення  $c_{i-1}$ , м/с у середовище  $i$  з більшою швидкістю поширення  $c_i$ , м/с при перевищенні фактичним кутом падіння  $\varphi$  його граничного значення, обумовленого як:

$$\sin \varphi_{\text{граничне}} = \frac{c_{i-1}}{c_i}; \quad (3.7)$$

де  $\varphi_{\text{граничне}}$  - граничне значення кута падіння (рис. 3.1).

На базі [99, с. - 243, 273] можна вказати, що при переході із середовища  $i-1$ , що характеризується меншою швидкістю поширення поперечних звукових хвиль у середовище  $i$  з більшою швидкістю поширення поперечних звукових хвиль,  $X > \varphi$ ; переломлений промінь  $i$  відхиляється від нормалі, причому кут падіння  $\varphi$  не може

перевищувати деякого граничного значення  $\varphi_{\text{граничне}}$ , тому що  $\sin \varphi$  не може бути  $> 1$ .

Якщо фактичне значення  $\varphi > \varphi_{\text{граничне}}$ , згідно [99, с. - 273] відбувається повне внутрішнє відбиття, і вся енергія звукової хвилі  $i$  відбивається назад у те середовище  $i-1$ , звідки вона прийшла, маючи швидкість поширення  $c_{i-1} < c_i$ .

Взаємозв'язок кута падіння і кута переломлення при повному внутрішньому відбитті хвиль легко може бути обчислений за відомими залежностями. Так, у роботі [105] прямо вказується, наприклад: «Правильнее было бы назвать предельным углом тот угол падения, при котором угол преломления светового пучка, вошедшего в оптически менее плотную среду - если бы он существовал - был бы менее  $\pi/2$ ».

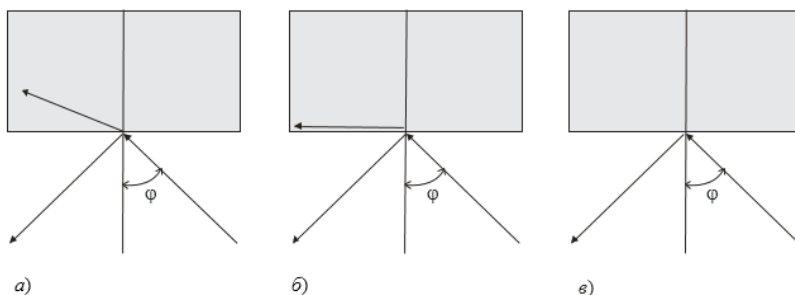


Рис. 3.3 – Відбиття хвиль при різних кутах падіння:

а) кут падіння менше граничного значення:  $\varphi < \varphi_{\text{граничне}}$ ;

б) кут падіння дорівнює граничному значенню:  $\varphi = \varphi_{\text{граничне}}$ ;

в) кут падіння більше граничного значення:  $\varphi > \varphi_{\text{граничне}}$

Щодо випадків, представлених на рис. 3.3.а и рис. 3.3.в, усі порівняно просто. Однак не завжди зрозуміло, куди ж подінеться переломлений промінь згідно рис. 3.3.б?

Виявляється, Л. І. Мандельштам ще в 1914 р. поставив експеримент, що показує, що при повному відбитті світло проникає на невелику глибину з оптично більш щільного в

оптично менш щільне середовище [105]. Цим же займався Ейхенвальд А.А. [106]. Побудована ним теорія показує, що при повному внутрішнім відбитті ЕМ хвиля частково проникає в оптично менш щільне середовище, причому глибина проникнення порівнянна з  $\lambda$  і залежить від  $\varphi$  світла і  $n$  граничних середовищ. При цьому уздовж границі розподілу середовищ поширюється своєрідна повздошно-поперечна хвиля. Виявляється також, що падаюча на границю розподілу хвиля при повному внутрішнім відбитті частково "поринає" в оптично менш щільне середовище і, пройшовши шлях довжиною порядку  $\lambda/2$ , «зринає назад». Відомо, що якщо два однакових середовища розділені тонким прошарком оптично менш щільного середовища, то при повному внутрішнім відбитті світло в стані переборювати цей прошарок.

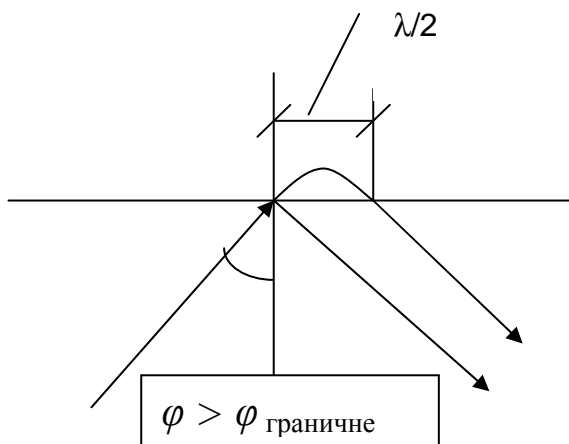


Рис. 3.4 – Повне внутрішнє відбиття хвиль в межах вищевказаних доповнень

### 3.5. Основні відомості про поляризацію хвиль

Поляризація хвиль - порушення осьової симетрії поперечної хвилі щодо її напрямку поширення. Відома поляризація світла [107, 108], можлива поляризація звуку у твердому середовищі [102].

Поляризацією світла називають сукупність явищ, у яких виявляється властивість поперечності ЕМ хвиль видимої (оптичної) частини спектра. Хвиля називається поляризованою, якщо в ній існує виділений напрямок коливань. Розрізняють кілька видів поляризації:

- 1) лінійна, чи плоска поляризація;
- 2) кругова, чи циркулярна поляризація;
- 3) еліптична поляризація.

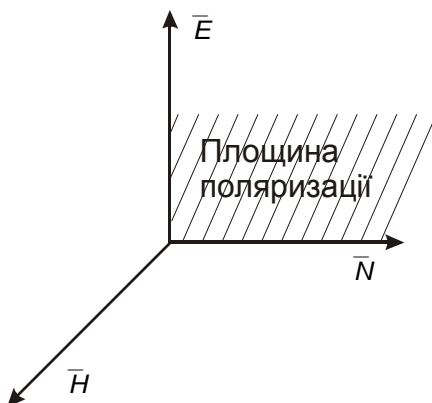


Рис. 3.5 – Площина поляризації - площина, що проходить через два вектори  $\vec{E}$  и  $\vec{N}$  поперечної електромагнітної хвилі

Поляризація можлива тільки в поперечних хвилях [109]. Плоска світлова хвиля називається лінійно поляризованою, якщо її електричний вектор  $\vec{E}$  увесь час знаходиться в одній площині, у якій розташована нормаль  $\vec{N}$  до фронту хвилі.



За напрямок поляризації світлової хвилі прийнятий напрямок вектора напруженості магнітного поля  $H$ , а за напрямок коливань — напрямок коливань вектора напруженості електричного поля  $E$ . Природне світло неполяризоване, тому що воно випромінюється атомами, орієнтованими в просторі довільно. У ньому вектори  $E$ ,  $H$  та  $N$  у кожен момент часу взаємно перпендикулярні, але напрямок векторів  $E$  і  $H$  змінюється згодом довільно.

Природне світло характеризується в середньому осьовою симетрією щодо напрямку його поширення. Пристрої, за допомогою яких природне світло можна перетворити в поляризоване, називають поляризаторами. Найпростішим поляризатором є пластинка турмаліну, вирізана паралельно його кристалографічної (оптичної) осі. Турмалін сильно поглинає світлові промені, у яких вектор електричної напруженості  $E$  перпендикулярний оптичній осі. Якщо вектор  $E$  рівнобіжний цієї осі, то відповідні промені проходять через турмалін практично без поглинання. Тому світло, що пройшло через таку пластинку, стає лінійно поляризованим з вектором  $E$ , рівнобіжним оптичній осі турмаліну.

Поляризатори, використовувані для дослідження поляризації світла, називають аналізаторами. Для лінійно поляризованої світлової хвилі, що пройшла через аналізатор, справедливий закон Малюса

$$I = kI_0 \cos^2 \alpha, \text{ Вт/м}^2,$$

де  $I$  — інтенсивність хвилі на виході аналізатора,  $I_0$  — інтенсивність вхідного в нього світла,  $\alpha$  — кут між площинами поляризації вхідного і вихідного світла,  $k$  — коефіцієнт прозорості аналізатора ( $0 < k \leq 1$ ).

Дві електромагнітні (світлові) хвилі, лінійно

поляризовані у взаємно перпендикулярних площинах, при додаванні утворюють хвилю, поляризовану еліптично:

$$\frac{E_x^2}{E_{0x}^2} - \frac{2E_xE_y}{E_{0x}E_{0y}} \cos\delta + \frac{E_y^2}{E_{0y}^2} = \sin^2\delta,$$

де  $E_x = E_{0x} \cos \omega t$ ;  $E_y = E_{0y} \cos (\omega t + \delta)$

— компоненти вектора електричної напруженості  $E$  уздовж осей  $x$  и  $y$ , що роблять коливання з однаковою частотою  $\omega$ ;  $\delta$  — початкова фаза. Аналогічне рівняння еліпса справедливо і для магнітного вектора  $H$ . У такій хвилі кінець електричного (і магнітного) вектора в кожній точці простору рухається за еліпсом.

Поляризація подовжніх звукових хвиль у повітрі при моделюванні процесів їхнього поширення в просторі для прогнозування шумового режиму об'єктів, що захищаються, неможлива.

Спеціальні відомості про поляризацію звуку у твердих середовищах, засновані на власних дослідженнях автора, див. далі.

### 3.6. Якщо поляризувати звук?

За нашими даними [103], у певних умовах можлива також й поляризація звуку у твердому середовищі.

Нами було запропоновано використовувати той же принцип поляризації, (відомий для світла), стосовно до звукових хвиль у твердих тілах. Ця пропозиція може бути застосована, наприклад, для створення шумозахисних екранів, звукоізолюючих панелей і інших будівельних конструкцій з високими звукоізолюючими властивостями.

Основне мета при дослідженнях у даному напрямку полягала в тому, щоб виявити такі умови, а саме -

підібрати відповідні сполучення матеріалів, щоб згідно [110], забезпечити поляризацію звуку. Для кількісної оцінки явища треба було дати опис фізичних процесів, що відбуваються в товщі багатошарових звукоізолюючих матеріалів при проходженні через них звуку, і вивести формули, що зв'язують деякі акустичні величини з такими величинами, як модуль зрушення матеріалу шарів і щільність середовища поширення. У результаті створеної (у подальший розвиток [110]) фізичної теорії практична реалізація наших пропозицій здійснюється за рахунок простого підбора будівельних матеріалів (точніше, ряду їхніх фізико-хімічних характеристик) для проектованої багатошарової звукоізолюючої конструкції.

### **3.7. Фізичні основи поляризації звуку**

Згідно [80, с. 19] "звук в твердых телах ... отличается от звука в жидкостях и газах тем, что в твердых телах возникают сдвиговые напряжения и деформации... Из основного уравнения теории упругости следует, что каждое волновое движение в твердых телах может быть представлено в виде суммы чистых продольных волн (свободная от вращения составляющая) и чистых поперечных волн (свободная от расширения составляющая)". Цей факт застосовано в наших розробках згідно [102, 111].

При цьому поздовжня складова порівняно просто може бути погашена додатковим звуковбирним покриттям, основну складність представляє боротьба з поперечною складовою, що, до того ж, переносить більшу частину енергії звукової хвилі.

Для боротьби з нею автором ще в кандидатській дисертації [112] уперше у світі було запропоновано

застосувати спосіб поляризації поперечних звукових хвиль. Поляризація світла, наприклад, дуже широко використовується при створенні різноманітних оптичних пристроїв, у число яких входять: прояснені об'єктиви біноклів і фотоапаратів, індикатори електронних годинників, світлофільтри, швидкодіючі світлові діафрагми, знако-символьна індикація в рідкокристалічних індикаторах, і навіть сонцезахисні окуляри!

Відомі наступні види поляризації світла, які, виходячи з аналогії звукового й оптичного випромінювання, доведеної автором [113, 114, 115], можуть бути застосовані для ослаблення інтенсивності поперечних хвиль, (у т.ч. звукових):

1. Поляризація при відбитті;
2. Поляризація при подвійній променезаломлюваності;
3. Обертання площини поляризації оптично активними речовинами.

У кандидатській дисертації автора дослідження велися за п. 1, як технічно найбільше просто здійсненному стосовно до звуку. Суть наших подальших розробок 1996-2006 р. полягає в розвитку цих первісних ідей, та виведення їх на якісно новий рівень.

Пристрої, за допомогою яких з неполяризованих одержують поляризовані хвилі, називають поляризаторами, а пристрої, за допомогою яких виявляють поляризацію - аналізаторами (за принципом дії ідентичні поляризаторам). Ефект (у вигляді поляризації хвиль) досягається при їхній спільній дії. Завдання, що стояла в даних дослідженнях, полягала в тім, щоб підібрати таку пару: "поляризатор - аналізатор" для звуку. Кандидатська дисертація автора [112] дає тільки загальні позначки,

указуючи тільки на принципову можливість вирішення завдання із зниження шуму таким способом, у наступний після її захисту період ці дослідження вступили в новий етап свого розвитку. Зокрема, в 1997 р. отримане позитивне рішення на видання патенту на винахід "Способ ослабления интенсивности звуковых волн" [102], і розроблене теоретичне обґрунтування фізичних процесів, що відбуваються при цьому. Явище поляризації звуку загалом еквівалентно явищу зі світла, але математичний опис поляризації звуку має ряд специфічних особливостей у порівнянні з математичним описом поляризації світла.

### **Висновки до розділу 3**

Третій розділ присвячено опису фізичного явища поляризації світла та деяких інших супутніх хвильових явищ. Запропоновано застосувати той же принцип для поляризації звуку з метою зменшення рівнів шуму.

## **4. АВТОРСЬКІ НАУКОВІ ТЕОРІЇ ОСЛАБЛЕННЯ ІНТЕНСИВНОСТІ ЗВУКУ ПРИ СТВОРЕННІ ШУМОЗАХИСНИХ ЗАСОБІВ**

### **4.1. Теза про принципову неможливість зниження шуму в джерелі виникнення до нуля дБ**

В [85] ми говорили, що всі методи боротьби із шумом поділяються на методи боротьби із шумом на шляху його поширення і в джерелі його виникнення, - (згідно [15]). Може, перші з них зовсім непотрібні? Якщо можна подолати шум на виробництві за рахунок заходів боротьби з ним безпосередньо в джерелі виникнення – навіщо тоді якісь інші розробки?

Боротьба із шумом на шляху його розповсюдження має надвелику актуальність та не може бути замінена якимись іншими заходами.

В роботі [65] висунута теза про принципову неможливість зниження шуму в джерелі виникнення до нуля дБ (і неможливості повної відмови від боротьби із шумом на шляху його поширення). Справа в тому, що частина "механічної потужності" машини є "акустичною потужністю" цієї машини. Знижуючи шум у джерелі виникнення, ми тим самим ... підвищуємо ККД даної машини!

Однак підвищення ККД до 100% принципово неможливо (порушення закону збереження енергії). Отже, за рахунок чисто конструкторських і технологічних заходів неможливо знизити шум у джерелі шуму до нуля; частина шуму пошириться від джерела в навколишньому середовищі; і ніколи не знижується актуальність заходів щодо боротьби із шумом на шляху його поширення [65].

Далі побачимо, як реалізувати зниження шуму

запропонованими методами.

#### **4.2. Наукова теорія, що пояснює процеси зниження шуму при переході звуковою хвилею границі розподілу середовищ**

Існує безліч наукових теорій, що пояснюють механізм зниження шуму в різного роду шумозахисних пристроях: звукоізолюючих панелях й екранах, звукобирних облицюваннях й ін. Це питання досліджувалося в працях відомих вчених-акустиків: Осипова Г.Л., Юдина Е.Я., Сафонова В.В., Самойлюка Е.П. та ін., у дослідженнях закордонних авторів, йому присвячені численні дисертаційні роботи, і т.п. Однак кожний з дослідників, створюючи власну теорію зниження шуму, досліджує вузьку, локальну область додатка результатів його досліджень. У той же час було б цікаво інтегрувати їхні досягнення в різних підгалузях акустики, створити єдину теорію, що пояснює "механізм" зниження шуму.

Вихідною передумовою для нашого узагальнення [116, 118, 117] є аксіоматичний, давно підтверджений і всім відомий факт про те, що в рідині й у газі розповсюджуються поздовжні звукові хвилі, у твердому середовищі – комбінація поздовжньої і поперечної звукової хвилі: (вигинові, крутильні й ін. хвилі - у залежності від співвідношення поздовжньої й поперечної складової й просторової орієнтації вектора зсуву в товщі пружного середовища твердого тіла) [119, 99].

Сутністю пропонованої теорії зниження шуму є визнання того безперечного факту, що **ослаблення інтенсивності звукової енергії при зіткненні звукової хвилі з перешкодою відбувається за рахунок видозміни векторів коливальної швидкості й зсуву звукової хвилі**

**при перетинанні границь розподілу різних середовищ**, тобто за рахунок перетворення поздовжньої звукової хвилі в поперечну, наприклад, при переході границі розподілу середовищ: "повітря - тверде тіло" (зниження шуму при падінні звукової хвилі з повітря на звукоізолюючий екран); за рахунок зміни напрямку векторів коливальної швидкості й зсуву (перетворення поперечної хвилі одного типу в поперечну ж хвилю іншого типу) при переході границі розподілу двох твердих тіл з різними фізико-хімічними характеристиками (зниження шуму усередині багатошарової звукоізолюючої панелі типу "сандвіч") і ін.

Що міняється в результаті постулювання цього факту? На перший погляд, начебто б нічого?!! Старі, відомі теорії зниження шуму, що належать перу інших авторів, однаково продовжують діяти: тому що наша теорія їх не спростовує. Ми пояснюємо зниження інтенсивності звуку як результат **перетворення** хвилі одного типу у хвилю іншого типу; інші автори, не акцентувати увагу саме на перетворенні (хоча, природно, визнаючи цей безперечний факт), пояснюють те ж саме ослаблення інтенсивності, опираючись на кінцеві фактори процесу шумозниження: (товщину, хімічний склад і фізико-механічні властивості перешкоди на шляху поширення, і ін.)

Наприклад, відома емпірична залежність зниження шуму при влученні його з повітря на тверду перешкоду залежно від маси цієї перешкоди (товста бетонна стіна захищає внутрішні приміщення будинку краще, ніж тонка й менш масивна). Однак, згідно нашої теорії, зниження шуму в цьому випадку обумовлено саме умовами перетворення звукової хвилі із поздовжньої (повітряної) у поперечну (структурний звук); маса акустичного екрана -



лише неминучий **наслідок**, а аж ніяк не вихідна передумова! Збільшуючи масу й товщину перешкоди, ми змінюємо умови перетворення поздовжньої хвилі в поперечну; пропорційно росту маси й товщини змінюється й індекс звукоізоляції. Ослаблення звуку в однакових умовах перешкодами однієї й тієї ж товщини, виготовленими з різних матеріалів, як відомо, здійснюється різним чином (цегельна стіна, або бетонна панель, або металевий аркуш однакових габаритних розмірів і конфігурації, розташовані на шляху однієї й тієї ж звукової хвилі, знижують шум на різну кількість децибелів). Згідно нашої теорії, **хімічний склад матеріалу змінює умови перетворення хвилі**, тобто очевидно, що в кожному з описаних трьох випадків у твердому середовищі (цегельної, бетонної або металевої перешкоди) хвиля буде поширюватися різним чином, - і, отже, ослаблення інтенсивності характеризується різними між собою величинами.

Відомо, що багатошарові звукоізолюючі конструкції володіють значно більшою звукоізолюючою здатністю, ніж одношарові (точно такої ж товщини; виготовлені з того ж самого матеріалу, що й будь-який один із шарів). З погляду нашої теорії цікавість являють собою не самі фізико-механічні характеристики матеріалу, з якого виготовлена така конструкція, а саме **співвідношення** цих характеристик для кожної пари шарів. Взагалі, на наш погляд, ефективність звукоізоляції залежить від збільшення кількості переходів через границі розподілу середовищ. Чим більше границь - тим більше стрибкоподібних перетворень векторів коливальної швидкості й зсуву хвилі, - тим, відповідно, сильніше

послабляється звук. Наприклад, розглянемо шумозахисні властивості віконної рами: (вікна - головне джерело проникнення вуличного шуму усередину будинку, розташованих уздовж магістралей з інтенсивним рухом транспорту). Одинарне віконне скло, - (трансформація звукової хвилі "повітря - скло - повітря"), - характеризується низькою звукоізолюючою здатністю й у цей час практично не застосовується. Подвійне віконне скло (яке, на нашу думку, ефективніше одинарного саме за рахунок більшої кількості переходів: "повітря - скло - повітря - скло - повітря", тобто багаторазової трансформації "поздовжня звукова хвиля - поперечна - поздовжня - поперечна - поздовжня") як шумозахисний засіб поступилося зараз місцем потрібному віконному склу: (кількість переходів через границю розподілу середовищ ще більше) [120].

Найкращий доказ нашої теорії - пористі звуковбирні матеріали [121]. У їхній внутрішній структурі, де "кістяк" твердого матеріалу багаторазово чергується з порами, кількість переходів через границю розподілу середовищ максимальний! І, як наслідок, - відомі дані про їхню найвищу ефективність у плані боротьби із шумом.

Як відомо, основну цінність представляє не самі постулати, а наслідки. Так, заявивши про збільшення зниження інтенсивності звуку при збільшенні кількості трансформацій звукової хвилі при багаторазовому переході через границі різнорідних середовищ поширення, ми постулюємо факт створення багатошарових (і тонкостінних) звукоізолюючих екранів з найвищою ефективністю в плані боротьби із шумом. Принципово можливо замість дорогої товстеної одношарової

звукоізолюючої плити, (виготовленої, наприклад, з металу), створити дешевий, легкий, тонкий екран, що представляє собою набір тонкостінних пластин з повітряним проміжком між ними (або без нього: заповнюється визначеними матеріалами). Весь секрет криється в підборі матеріалів для кожного шару: вид матеріалу для кожного шару, його товщина й ін. характеристики в обов'язковому порядку різні й визначаються, виходячи з виведених нами теоретичних співвідношень. Що ж це за співвідношення? Тут варто звернутися, у першу чергу, до нашого запатентованого винаходу "Способ ослабления интенсивности звуковых волн" [102].

Подібний же принцип, - при зовнішній неадекватності пристроїв, - застосований у створенні звукобирної панелі з пористих матеріалів [122]. При її конструюванні також були застосовані вищевказані ідеї, що впливають із наших попередніх розробок.

#### **4.3. Фізичні основи поляризації звуку**

Відомо, ([110]), що звукові хвилі у визначених умовах здатні до поляризації. Відповідно до хвильової теорії фізики, поляризація хвиль являє собою порушення осьової симетрії поперечної хвилі щодо її напрямку поширення. Поляризація світла добре відома, і широко використовується в техніці. По нашим даним [103], у визначених умовах можлива також й поляризація звуку у твердому середовищі.

Нами було запропоновано використовувати той же принцип поляризації, (відомий для світла), стосовно до звукових хвиль у твердих тілах. Ця пропозиція може бути застосована, наприклад, для створення шумозахисних

екранів, звукоізолюючих панелей і інших будівельних конструкцій з високими звукоізолюючими властивостями [123].

Основна задача при дослідженнях у даному напрямку полягала в тому, щоб виявити такі умови, а саме - підібрати відповідні сполучення матеріалів, щоб згідно [110], забезпечити поляризацію звуку. Для кількісної оцінки явища треба було дати опис фізичних процесів, що відбуваються в товщі багат шарових звукоізолюючих матеріалів при проходженні через них звуку, і вивести формули, що зв'язують деякі акустичні величини з такими величинами, як модуль зрушення матеріалу шарів і щільність середовища поширення. У результаті створеної (у подальший розвиток [110]) фізичної теорії [102] практична реалізація наших пропозицій здійснюється за рахунок простого підбора будівельних матеріалів (точніше, ряду їхніх фізико-хімічних характеристик) для проектованої багат шарової звукоізолюючої конструкції (див. далі).

Поляризатор (див. рис. 4.1) - шар матеріалу  $i$  й пропускає тільки компоненту хвилі  $y$  з певним напрямком коливань вектора зсуву  $\bar{S}_i$  (згідно с. 380 [104] вектор зсуву звукових хвиль еквівалентний вектору напруженості  $\bar{E}$  світла), виділяючи цей компонент із неполяризованої вихідної хвилі  $i-1$  у попередньому шарі  $i-1$ . Залежно від орієнтації аналізатора (шар матеріалу  $i+1$ ) цей поляризований компонент або проходить, або не проходить через нього. При схрещеному положенні поляризатора (шар  $i$ ) і аналізатора (шар  $i+1$ ), коли вони повернені відносно один одного на  $90^\circ$ , поперечні хвилі через них не проходять.

На відміну від світла, де поляризатором може бути перший шар твердої речовини (при падінні хвилі з повітря), поляризатором звуку може бути тільки другий шар, тому що в повітрі поширюється поздовжня звукова хвиля, і тільки лише потрапляючи в перший шар твердого матеріалу, переборюючи в перший раз границю розподілу середовищ "повітря - тверде тіло", вона утворить поперечну неполяризовану хвилю. На відміну від цього, світло вже споконвічно в повітрі поводитьсь, як поперечна неполяризована хвиля, тому для забезпечення поляризації світла в багатошаровій світлопроникній конструкції потрібно на 1 шар менше.

Таким чином, багатошарова звукоізолююча конструкція повинна мати щонайменше 3 шари: перший (шар  $i-1$  {на рис. 4.1 він поіменований як «шар 1»}), що утворить поперечну хвилю, другий (шар  $i$  {на рис. 5.1 він поіменований як «шар 2»}) - поляризатор, третій (шар  $i+1$  {на рис. 4.1 він поіменований як «шар 3»}) - аналізатор. Ми застосуємо позначки нумерації шарів в загальному вигляді  $i-1$ ,  $i$ ,  $i+1$  (не дарма). Оскільки компонента хвилі при поляризації є частково лінійно-поляризованою, кількість шарів може бути більшою, при цьому кожен наступний шар  $i+1$  стосовно попереднього шару  $i$  (за винятком самого найпершого з шарів  $i-1$ , що контактує безпосередньо з повітрям і служить для утворення поперечної хвилі, і другого шару  $i$  – саме винятково поляризатора) є аналізатором, а стосовно наступних за ним шарів - поляризатором. Чим більше шарів, тим сильніше виражений ефект поляризації.

Кожен шар  $i$  твердого матеріалу характеризується своєю швидкістю поширення поперечних звукових хвиль,

що згідно з нашими даними [103, 102], визначається як:

$$c = \sqrt{G_i / \rho_i}, \text{ м/с,}$$

де  $\rho_i$  – щільність середовища, кг/м<sup>3</sup>, шару  $i$ ;

$G_i$  – модуль зсуву середовища, шару  $i$ .

За [99, с. 140]

$$G_i = E_i / (2(1 + \mu))$$

де  $E_i$  – модуль пружності, Па;

$\mu$  - коефіцієнт Пуассона:

$$1,2 < \mu < 1,5.$$

Отже, ми маємо всі вихідні дані для подальшого розгляду процесів поляризації звуку.

Поляризація звуку відбувається при його відбитті й переломленні на переході границі розподілу твердих тіл, що характеризуються різними швидкостями поширення поперечної звукової хвилі [102]. Падаюча на будь-яку (будівельну, шумозахисну, та ін.) конструкцію первісна звукова хвиля 0 у повітрі, (що є поздовжньою), частково відбивається від неї і частково попадає в товщу твердого тіла, де поширюється через його шар  $I$  у вигляді поперечної неполяризованої хвилі  $I$ , що характеризується різноспрямованими векторами зсуву  $\bar{S}_I$ , і коливальної швидкості  $\bar{v}_I$  часток пружного середовища, тобто в кожній точці простору  $I$  у всіляких напрямках у площині, перпендикулярної до напрямку поширення хвилі  $I$ , ці вектори  $S_I$  і  $v_I$ , швидко й безладно міняють один одного, так що жодний із цих напрямків не є переважним [103]. Переборюючи границю розподілу між шарами I й II твердого тіла, що характеризуються різними швидкостями

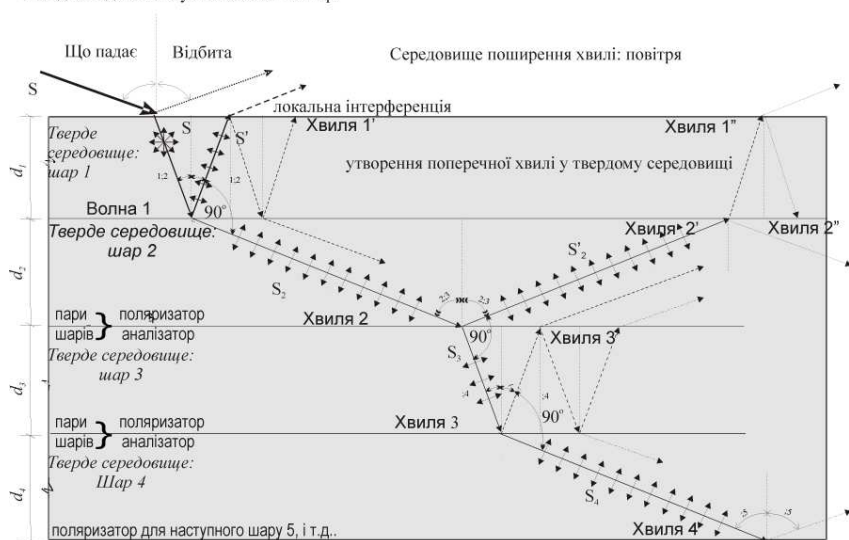
поширення поперечної звукової хвилі  $c_I$ , та  $c_{II}$ , хвиля поляризується, причому через границю розподілу між шарами I й II твердого тіла пропускається компонент хвилі - промінь 2, що характеризується переважно певним напрямком вектора зсуву часток  $\bar{S}_2$ . У цьому випадку виконується закон Брюстера - умова, при якому хвиля  $I^I$  в шарі I, відбита від границі розподілу, повністю поляризована (вектор зсуву  $\bar{S}_1^I$  коливається перпендикулярно до площини падіння), відбитий  $I^I$  і переломлений 2 її промені взаємно перпендикулярні, пропущений компонент хвилі - промінь 2 - частково поляризований (вектор  $\bar{S}_2$ , коливається переважно в площині падіння):

$$\operatorname{tg} \alpha_A = c_I / c_{II} = \sqrt{\frac{G_I}{\rho_I} / \frac{G_{II}}{\rho_{II}}} = \sqrt{\frac{G_I \rho_{II}}{G_{II} \rho_I}} \quad (4.1)$$

де  $\alpha_A$ ,  $\alpha_B$ ,  $\alpha_C$  - кут Брюстера для границь розподілу відповідно А, В, С, ...

Переборюючи границю розподілу В між шарами II й III твердого тіла, що характеризуються різними швидкостями поперечної хвилі  $c_{II}$ , і  $c_{III}$ , хвиля 2 повторно поляризується, причому через границю розподілу В пропускається компонент хвилі - промінь 3, частково поляризований (вектор зсуву  $\bar{S}_3$ , коливається переважно в площині падіння), а відбитий від границі розподілу компонент - промінь 2' повністю поляризований й перпендикулярний до променя 3.

Вихідна подовжня звукова хвиля в повітрі



Переломлена хвиля 1 - не поляризована  
Відбиті хвилі 1'; 2'; 3'; ... частково лінійно поляризовані перпендикулярно площині падіння.  
Переломлені хвилі 2; 3; 4; ... частково лінійно поляризовані в площині падіння через розходження швидкостей розповсюдження хвилі в сусідніх шарах

Рис. 4.1 – Поляризація поперечної звукової хвилі в товщі твердого тіла

У цьому випадку кут Брюстера може бути обчислений з виведеного нами співвідношення:

$$\operatorname{tg} \alpha_B = c_{II} / c_{III} = \sqrt{\frac{G_{II}}{\rho_{II}}} / \sqrt{\frac{G_{III}}{\rho_{III}}} = \sqrt{\frac{G_{II} \rho_{III}}{G_{III} \rho_{II}}} \quad (4.2)$$

$$\operatorname{tg} \alpha_A \neq \operatorname{tg} \alpha \quad (4.3)$$

Якщо матеріали шарів різні між собою (в іншому випадку це буде просто не багатшарова конструкція, а ізотропна), то:

$$\begin{cases} G_I \neq G_{II} \neq G_{III} \\ \rho_I \neq \rho_{II} \neq \rho_{III} \end{cases} \quad (4.4)$$



Тому вектор зсуву  $\overline{S}_3$  коливається в іншій площині, аніж вектор  $\overline{S}_2$ , відповідно границя розподілу В відбиває значну частину інакше поляризованої звукової хвилі 2. Крім того, відбувається також поглинання звукової енергії, тобто вона переходить у теплову. Влаштування великої кількості таких шарів, виконання їх зі спеціальних звукобирних матеріалів (щоб ефективно гасилася подовжня складова хвилі) таким чином, щоб для кожної границі розподілу виконувалася умова  $tga \rightarrow 1$ , дозволяють різко підвищити загальну звукоізолюючу здатність шумозахисної конструкції [103, 123].

Спосіб ослаблення інтенсивності звукових хвиль, відповідно до формули найбільш суттєвого винаходу [102], полягає в ослабленні інтенсивності при їхньому проходженні через багатшарову тверду перешкоду, і відрізняється тим, що подовжню звукову хвилю перетворюють у неполяризовану поперечну, пропускаючи її через перший шар твердого матеріалу, що характеризується довільним напрямком волокон, потім поляризують, пропускаючи її через другий шар твердого матеріалу - поляризатора, що характеризується визначеним напрямком волокон, потім повторно поляризують, пропускаючи її через третій шар твердого матеріалу - аналізатора, що характеризується перпендикулярним напрямком волокон стосовно попереднього шару.

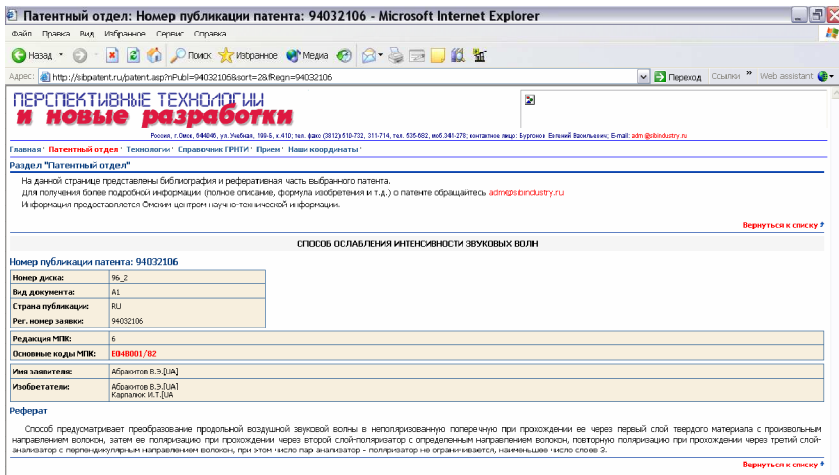


Рис. 4.2 – Офіційна публікація в Інтернет патентного документу [102] за веб-адресою [124]

При цьому здійснюють багаторазову поляризацію за рахунок збільшення числа пар поляризатор - аналізатор, тобто за рахунок збільшення шарів твердого матеріалу, що розрізняються між собою по орієнтації волокон, причому загальна кількість шарів дорівнює:

$$N = I + n, \quad (4.5)$$

де  $n$  - число, кратне 2 ;  $N \geq 3$ .

При цьому наявність кожного шару забезпечує свою, специфічну, властиву йому функцію.

Наявність першого шару твердого матеріалу з довільним напрямком волокон на шляху поширення звуку забезпечує виникнення в його товщі поперечної складової звукової хвилі. Таким чином, у ньому відбувається перетворення повітряної звукової хвилі, що є подовжньою, у поперечну хвилю. Ця поперечна хвиля потім може бути піддана поляризації. Таким чином, наявність першого

шару матеріалу з довільним напрямком волокон забезпечує виникнення неполяризованої поперечної хвилі. Орієнтація волокон матеріалу при цьому може бути довільною.

Наявність другого шару з визначеним (і притім рівнобіжним) напрямком волокон забезпечує умови для здійснення хвильового явища поляризації звуку, тобто одержання поляризованої хвилі з неполяризованої. Цей шар, називаний "поляризатор", пропускає компоненту хвилі 2 з визначеним напрямком коливань вектора зсуву  $\bar{S}_2$ , (який еквівалентний вектору напруженості  $\bar{E}$  світла). Цей компонент виділяється їм з неполяризованої вихідної хвилі 1 у першому шарі. Далі, проходячи через другу границю розподілу середовищ (середовище 2 / середовище 3), хвиля надходить на третій шар, (відповідно з загальноприйнятою у фізиці термінологією називаний "аналізатор").

У залежності від орієнтації волокон матеріалу третього шару цей поляризований компонент або проходить, або не проходить через нього. Це обумовлено збігом (чи розбіжністю) напрямків коливань вектора зсуву  $\bar{S}_2$  (у шарі поляризатора) з напрямком коливань  $\bar{S}_3$  (у шарі аналізатора). Якщо вісь аналізатора (напрямок волокон шару 3) складає кут  $\theta$  з напрямком коливань вектора  $\bar{S}_2$ , у кожному з волокон шару 3 (аналізатору) виникає звукова хвиля, що характеризується вектором  $\Delta \bar{S}_3$ :

$$\Delta \bar{S}_3 = - \bar{S}_2.$$

Оскільки напрямки коливань у шарах 2 і 3 різні (з огляду на вищезгаданий кут  $\theta$ ),  $\Delta \bar{S}_3$  компенсує складову вектора  $\bar{S}_2$  у цьому напрямку, а результуючий вектор  $\bar{S}_3$

буде являти собою тільки складову вектора  $\overline{S}_2$ , рівнобіжну осі.

Результуюче поле за шаром 3 (шаром аналізатора) у векторному вигляді:

$$\overline{S}_3 = \overline{S}_2 + \Delta \overline{S}_3 = 0,$$

чи, то ж саме:

$$\overline{S}_3 = \overline{S}_2 * \cos \theta.$$

Інтенсивність поперечної звукової хвилі в шарі 3 може бути розрахована як:

$$I_3 = I_2 * \cos^2 \theta, \text{ Вт/м}^2,$$

де  $I_2$  - інтенсивність звукової хвилі в шарі поляризатора, Вт/м<sup>2</sup>;

$I_3$  - інтенсивність звукової хвилі в шарі аналізатора, Вт/м<sup>2</sup>;

$\theta$  - кут між напрямком волокон шару аналізатора 3 і напрямком коливань вектора  $\overline{S}_2$  (тобто площиною поляризації).

Для збільшення ефективності може бути здійснена багаторазова поляризація за рахунок збільшення числа пар "поляризатор-аналізатор", кожна з яких відрізняється від попередньої по взаємній орієнтації волокон.

При цьому твердження в нашому вищенаведеному тексті, що стосуються шарів 2 і 3, справедливі для кожної їх пари.

Загальну кількість шарів можна підрахувати за формулою (4.5):

$$N = 1 + n \geq 3,$$

де  $n$  - число пар "поляризатор-аналізатор" (чисто математично - число, кратне 2).

Сутність винаходу [102] полягає в наступному. З основного рівняння теорії пружності випливає, що кожен

хвильовий рух у твердих тілах можна представити у виді суми чистих подовжніх (вільна від обертання складова) і чистих поперечних (вільна від розширення складова) хвиль. Одне з характерних хвильових явищ для поперечної хвилі - її поляризація [102], що відбувається в багатошаровому матеріалі.

Поляризація звуку (див. рис. 4.2) відбувається при його відбитті і переломленні на переході границі розподілу твердих тіл, що характеризуються різними швидкостями поширення поперечної звукової хвилі. Падаюча на будівельну конструкцію вихідна звукова хвиля  $O$  у повітрі, що є подовжньої, частково відбивається від її  $O'$  і частково попадає в товщу твердого тіла, де поширюється по його шарі 1 у виді поперечної неполяризованої хвилі, що характеризується різноспрямованими векторами зсуву  $\vec{S}_I$ , і коливальної швидкості  $\vec{v}_1$  часток пружного середовища, тобто в кожній точці простору (шар 1) по всіляких напрямках у площині, перпендикулярної до напрямку поширення хвилі  $I$ , ці вектори  $\vec{S}_I$ , і  $\vec{v}_I$ , швидко і безладно переміняють один одного, так що жодний з цих напрямків не є переважним.

У роботах [103, 102] ми говорили, що  $c$  – швидкість поширення поперечної звукової хвилі в пружному середовищі, - у загальному випадку може бути обчислена зі співвідношення:

$$c = \sqrt{G/\rho}, \text{ м/с,}$$

де  $\rho$  – щільність середовища,  $\text{кг/м}^3$ ;

$G$  – модуль зсуву середовища.

Однак, по нашим уточненим даним, у даному випадку (поширення структурного шуму в товщі багатошарової

перешкоди, кожен шар якої являє собою плоску пластину) ми маємо справу з згинаючими хвилями, швидкість поширення яких може бути обчислена по трохи інших формулах, уперше приведеним нижче.

Продовжимо розгляд фізики процесу при проходженні звукової хвилі через товщу багат шарового твердого тіла відповідно до нашого винаходу [102].

Як ми вже говорили вище, переборюючи першу границю розподілу між шарами 1 і 2 твердого тіла, що характеризуються різними швидкостями поширення поперечної звукової хвилі  $c_1$ , і  $c_2$  відповідно, хвиля поляризується, причому через границю розподілу шарів 1 і 2 пропускається компонент хвилі - промінь 2, що характеризується переважно визначеним напрямком вектора зсуву часток  $\vec{S}_2$ . У цьому випадку виконується закон Брюстера - умова, при якій хвиля 1 у шарі 1, відбита від границі розподілу шарів 1 і 2, цілком поляризована (вектор зсуву  $\vec{S}_1$  коливається перпендикулярно до площини падіння), відбитий 1' і переломлений 2 її промені взаємно перпендикулярні, пропущена компонент хвилі - промінь 2 - частково поляризований (вектор  $\vec{S}_2$  коливається переважно в площині падіння).

Тангенс кута падіння  $\theta_{1,2}$  при цьому може бути обчислений як відношення швидкостей поширення згинаючих звукових хвиль у шарах 1 і 2:

$$\operatorname{tg} \theta_{1,2} = c_1 / c_2 = \sqrt[4]{\frac{D_1 \omega_1^2}{m_1} \cdot \frac{m_2}{D_2 \omega_2^2}} =$$

$$\sqrt[4]{\frac{E_1 d_1^3 \omega_1^2}{12(1-\mu_1^2)m_1} / \frac{E_2 d_2^3 \omega_2^2}{12(1-\mu_2^2)m_2}} =$$

$$= \sqrt[4]{\frac{E_1 d_1^3 \omega_1^2 12(1-\mu_2^2) m_2}{12(1-\mu_1^2) m_1 E_2 d_2^3 \omega_2^2}} = \sqrt[4]{\frac{(1-\mu_2^2) \rho_2 E_1 d_1^2 \omega_1^2}{(1-\mu_1^2) \rho_1 E_2 d_2^2 \omega_2^2}}$$

де  $\theta_{1;2}; \theta_{2;3}; \theta_{3;4}; \dots$  - кут Брюстера задля меж розподілу шарів 1 та 2; 2 та 3; ... відповідно;

$D_1; D_2; D_3; \dots$  - циліндрична твердість пластин (шарів 1; 2; 3; ... відповідно), Н·м, що обчислюється по формулі:

$$D = E \cdot d^3 / 12(1 - \mu^2), \text{ Н·м,}$$

$E_1; E_2; E_3; \dots$  - модуль пружності середовища (шарів 1; 2; 3; ...), Па;  $\mu_1; \mu_2; \mu_3; \dots$  - коефіцієнт Пуассона тих же шарів;  $\omega_1; \omega_2; \omega_3; \dots$  - кутова частота:

$$\omega = 2\pi f,$$

$f_1; f_2; f_3; \dots$  - частота коливань у звуковій хвилі, Гц;

$m_1; m_2; m_3; \dots$  - поверхнева щільність шарів 1; 2; 3; ... відповідно, (тобто маса пластин 1; 2; 3; ... відповідно на одиницю їхньої площі), кг/м<sup>2</sup>, що обчислюється по формулі:

$$m = \rho \cdot d,$$

де  $d_1; d_2; d_3; \dots$  - товщини матеріалу шарів 1; 2; 3; ... відповідно, м;

$\rho_1; \rho_2; \rho_3; \dots$  - щільності тих же шарів, кг/м<sup>3</sup>.

Переборюючи (другу) границю розподілу шарів 2 і 3 між наступними шарами твердого тіла, що характеризуються різними швидкостями поперечної хвилі  $c_2$ , і  $c_3$ , хвиля 3 повторно поляризується, причому через границю розподілу шарів 2 і 3 пропускається компонент хвилі - промінь 3, частково поляризований (вектор зсуву  $\vec{S}_3$  коливається переважно в площині падіння), а відбитий від границі розподілу компонент - промінь 2<sup>1</sup>

цілком поляризований і перпендикулярний до промінця 3. У цьому випадку кут Брюстера дорівнює:

$$\operatorname{tg} \theta_{2,3} = c_2/c_3 = \sqrt{\frac{(1-\mu_3^2)\rho_3 E_2 d_2^2 \omega_2^2}{(1-\mu_2^2)\rho_2 E_3 d_3^2 \omega_3^2}} \operatorname{tg} \theta_{1,2} \neq \operatorname{tg} \theta_{2,3}$$

Тому вектор зсуву  $\vec{S}_3$  коливається в іншій площині, аніж вектор  $\vec{S}_2$ , відповідно границя розподілу шарів 2 і 3 відбиває значну частину інакше поляризованої звукової хвилі 2. Крім того, відбувається також поглинання звукової енергії, тобто вона переходить у теплову.

Вищевказані залежності можуть бути застосовані тільки для поперечних хвиль у середовищах багатошарового твердого тіла, - але ніяк не для подовжніх хвиль.

Виходячи з цього, якщо розглядається звукоізоляція від повітряного шуму, перший шар твердої перешкоди 1 служить тільки для утворення поперечних хвиль у ньому, і повне внутрішнє відбиття можливе лише при переході поперечної звукової хвилі з нього в шар 2, що є в нашому прикладі другим по рахунку. У такому випадку також повинне виконуватися обговорене в описі явища поляризації звуку умова обов'язкової наявності в ньому не менш 3-х шарів. При цьому перший з них служить тільки для утворення поперечних звукових хвиль. Влаштування великої кількості таких шарів, виконання їх зі спеціальних звукобірних матеріалів (щоб ефективно гасилася подовжня складова хвилі) таким чином, щоб для кожної границі розподілу виконувалася умова  $\operatorname{tg} \theta_i \rightarrow 1$ , дозволяють різко підвищити загальну звукоізолюючу здатність будівельної конструкції. Якщо матеріали всіх трьох шарів різні, то, відповідно, величини, що входять у



формули, відрізняються між собою; і за рахунок належного підбора їхніх необхідних сполучень ми маємо можливість підібрати таке їхнє співвідношення, щоб забезпечити зниження інтенсивності звукової енергії при її поширенні в будівельній конструкції. При цьому (у залежності від співвідношення швидкостей звуку) можливі два варіанти:

$$\begin{array}{l}
 1) \quad c_1 \geq c_2; \\
 \quad c_1 / c_2 = \operatorname{tg} \theta_{1,2} \geq 1; \\
 \quad \theta_{1,2} > 45^\circ, \text{ аж до } \theta_{1,2} = 90^\circ.
 \end{array}
 \quad \left. \vphantom{\begin{array}{l} 1) \\ c_1 / c_2 = \operatorname{tg} \theta_{1,2} \geq 1; \\ \theta_{1,2} > 45^\circ, \text{ аж до } \theta_{1,2} = 90^\circ. \end{array}} \right\} \quad (4.6)$$

У такому випадку найбільше доцільно застосовувати поляризацію звукових хвиль, описану вище.

$$\begin{array}{l}
 2) \quad c_1 \leq c_2; \\
 \quad c_1 / c_2 = \operatorname{tg} \theta_{1,2} \leq 1; \\
 \quad \theta_{1,2} < 45^\circ, \text{ аж до } \theta_{1,2} = 0^\circ.
 \end{array}
 \quad \left. \vphantom{\begin{array}{l} 2) \\ c_1 / c_2 = \operatorname{tg} \theta_{1,2} \leq 1; \\ \theta_{1,2} < 45^\circ, \text{ аж до } \theta_{1,2} = 0^\circ. \end{array}} \right\} \quad (4.7)$$

При вищевказаних граничних умовах відбувається перехід подовжньої звукової хвилі із середовища 1 у середовище 2 товщі тіла.

#### **4.4. Застосування повного внутрішнього відбиття додатково до поляризації звуку**

Явище поляризації звуку може сполучатися з іншим відомим фізичним явищем: повним внутрішнім відбиттям. Фізичні основи й умови, необхідні для повного внутрішнього відображення, розглянуті вище. Правда, дослідження більшості авторів лежать саме в області опису повного внутрішнього відбиття світла. Очевидно, з огляду на єдину хвильову природу, ті ж самі фізичні процеси можуть відбуватися і при повному внутрішнім відображенні звуку.

Повертаючись до фізики процесів, що відбуваються в товщі багатошарового звукоізолюючого матеріалу, можна помітити наступне. Якщо розглядається звукоізоляція від

повітряного шуму, перший шар твердої перешкоди 1 служить тільки для утворення поперечних хвиль у ньому, і повне внутрішнє відображення можливе лише при переході поперечної звукової хвилі з нього в шар 2, що є в нашому прикладі другим по рахунку. У такому випадку також повинна виконуватися обговорена в описі явища поляризації звуку умова обов'язкової наявності в ньому не менш 2-х шарів. При цьому перший з них служить тільки для утворення поперечних звукових хвиль. З вищевказаного випливає, що для забезпечення явища повного внутрішнього відбиття поперечної складової звукової хвилі при переході із шару 1 у шар 2 швидкості поширення поперечної звукової хвилі  $c_1$  і  $c_2$  у них повинні співвідноситися, відповідно до (4.7). При цьому бажано, щоб  $\theta_{\text{граничне}} \rightarrow 0^\circ$ ; але  $\theta_{\text{граничне}} \neq 0^\circ$ :

У випадку поляризації звуку, а також для обліку явища повного внутрішнього відбиття необхідно також врахувати і товщину кожного із шарів  $d_i$  (за винятком лише зовнішнього, найпершого шару, що безпосередньо контактує з повітрям, і що служить, як показано вище, винятково для утворення поперечної звукової хвилі). Згідно [99, с. - 291], "падая на тонкую пленку, световой луч частично отражается от верхней, а частично - от нижней поверхностей пленки. Разность фаз отраженных волн зависит от разности хода лучей, которая в свою очередь определяется различием путей, и дополнительной разностью хода  $\lambda/2$ , вызванной изменением фазы на  $180^\circ$  при отражении от передней поверхности пленки". Зіставивши це з [99, с. - 243], зробимо висновок, що для поперечних звукових хвиль характерно аналогічне явище, як і для світла. Тільки в цьому випадку поняття "тонкая

пленка” замінюється поняттям  $i$ -й, (але не менш, ніж 2-й) шар твердої речовини товщиною  $d_i$ , м. Різниця ходу променів при нормальному падінні:

$$\delta = 2d_i \operatorname{tg} \alpha_{i-1,1} - \lambda/2 = 2d_i \frac{c_{i-1}}{c_i} - \lambda/2.$$

З умови  $\delta = k\lambda$ , м ( $k = 0; 1; 2; \dots$  - ціле число), впливає вираження для довжини хвилі  $\lambda$ , що відповідає:

- посиленню інтенсивності відбитих компонентів  $(i-1)^I$  и  $(i-1)^{II}$ :

$$\lambda = \frac{d_i c_{i-1}}{c_i (2k+1)}, \text{ м } (k = 0; 1; 2; \dots - \text{ціле число}). \quad (4.8)$$

- ослабленню інтенсивності відбитих компонентів  $(i-1)^I$  и  $(i-1)^{II}$ :

$$\lambda = \frac{d_i c_{i-1}}{c_i k}, \text{ м } (k = 0; 1; 2; \dots - \text{ціле число}). \quad (4.9)$$

Практична цінність цих співвідношень наступна. Якщо відома товщина шару  $d_i$ , при  $k = 1$  можна визначити довжину хвилі  $\lambda$ , при якій за рахунок інтерференційних явищ її компоненти гасять один одного; чи, навпаки, виходячи з максимальної інтенсивності на дискретній довжині хвилі  $\lambda$  підібрати товщину шару  $d_i$ , таким чином, щоб погасити її. Можливо і збільшення здатності шару  $i$  до відбиття звуку з дискретною довжиною хвилі  $\lambda$ , наприклад, в акустичних дзеркалах. Тим більш, що (4.9) являє собою:

$$k\lambda = 2d_i \frac{c_{i-1}}{c_i}, \text{ м; } (k = 0; 1; 2; \dots - \text{ціле число}). \quad (4.10)$$

Тобто гасінню підлягають усі хвилі з дискретними значеннями довжини хвилі, кратні  $\lambda$ , і обумовлені шляхом обчислення  $\lambda$  при  $k=1$ , і множення цього числа  $\lambda$  на цілі числа ( $k = 2; 3; 4; \dots$ )... Наприклад, якщо  $\lambda = 0,02$  м, -

гасінню підлягають, крім її, також хвилі з довжинами 0,04; 0,06; 0,08; 0,10; 0,12; ... м, і т.д.)

Таким чином, слід відзначити, що в рамках досліджень автора був винайдений принципово новий спосіб боротьби із шумом, авторські права якого захищені документом [102]. Він реалізує явище поляризації поперечної звукової хвилі в товщі багат шаровій звукоізолюючій панелі, можливість використання якого з метою зниження шуму показана в роботах [103, 110].

#### **4.5. Алгоритм розрахунку конструктивних параметрів багат шарових звукоізолюючих панелей типу «Сандвіч» з використанням явища поляризації звуку**

Однак безпосередньо для створення такої панелі принципової ідеї [102] недостатньо – необхідно визначити її основні технічні параметри, виконати її конструктивний розрахунок. Мова йде про багат шарову звукоізолюючу панель типу «сандвіч» [125]. Ця конструкція має ряд позитивних якостей: сучасний дизайн; необхідну звуко- і теплоізоляцію; водо- і паронепроникнення; пожежостійкість; екологічну безпечність; стійкість до погодних впливів і агресивних середовищ; безпеку транспортування і швидку, незалежну від часу року інсталяцію монтажних елементів; можливість повторного застосування; малу вагу порівняно з іншими конструктивними елементами аналогічного призначення; необхідну несучу здатність.

Панель типу «сандвіч» складається з 2-х тонких плит (шари 1 і 3), зв'язаних пружним проміжним шаром – серцевиною (шар 2). (Далі в тексті використовуються позначення 1, 2, 3, що вказують на приналежність даної

характеристики матеріалу тому чи іншому шару). Для зовнішніх шарів таких елементів конструкцій, як правило, використовують металеві профільовані листи з полімерним покриттям або інші міцні матеріали. У якості середнього шару застосовують менш жорсткі та більш легкі матеріали. Різні типи пінопластів, пластмас та інших типи синтетичних полімерних матеріалів не відповідають вимогам протипожежної безпеки та екології, тому зараз найширше застосовують матеріали природного походження, зокрема, на основі базальтових порід. Відмітна риса «сандвіча» - можливість сполучення достатньої твердості і необхідної величини звукоізоляції, що досягається правильним підбором їхніх конструктивних параметрів [103, 102, 110]. Потрібно забезпечити одночасне виконання двох взаємне суперечливих умов: забезпечення твердості при зрушенні серцевини, і (по можливості) більш високої граничної частоти.

Значення граничної частоти «сандвіча» потрібно задавати можливо найбільшим, щоб перекривався діапазон частот, необхідний для ізоляції шуму. Зокрема, при використанні таких конструкцій у житлових і суспільних будинках бажано, щоб  $f_{\text{загальн}} \geq 6500$  Гц. Однак це приводить до зменшення твердості серцевини при зрушенні (що грозить деформаціями, і навіть повним руйнуванням панелі). Гранична частота «сандвіча»  $f_{\text{загальн}}$ , Гц зв'язується з комплексним безрозмірним параметром  $x$ , що враховує твердість, залежністю

$$f_{\text{загальн}} = f_l \sqrt{1 - x^2}, \text{ Гц} \quad (4.11)$$

де  $f_l$  – гранична частота однієї з зовнішніх плит «сандвіча», Гц.

Найменша частота, при якій стає можливим явище хвильового збігу (тобто рівність швидкостей поширення звуку в хвилі згинання, і в повітрі), називається граничною, і визначається по формулі:

$$f_1 = \frac{c_g^2}{2\pi} \cdot \sqrt{m_1 D_1}, \text{ Гц} \quad (4.12)$$

де  $c_g$  – швидкість поширення звукової хвилі в повітрі, м/с;

$m_1$  - поверхнева щільність шару 1, кг/м<sup>2</sup>;

$D_1$  - циліндрична твердість шару 1, Н·м;

$c_{n1}$  - швидкість подовжньої хвилі в шарі 1, м/с.

Для суцільного огороження товщиною  $d_1$ , м, однак, ця формула (6.12) може бути трохи спрощена з урахуванням переходу від швидкості поширення поперечних хвиль у товщі твердого тіла до швидкості поширення подовжніх хвиль (довідкові дані):

$$f_1 = c_g^2 / (1,8 c_{n1} d_1), \text{ Гц}. \quad (4.13)$$

При підвищенні граничної частоти панелі «сандвіч»  $f_{\text{загальн}}$  безрозмірний параметр  $x$  у формулі (4.11) прагне до зменшення. Доцільно задавати співвідношення:

$$x^2 \geq 0,1, \quad (4.14)$$

оскільки при його менших значеннях гранична частота  $f_{\text{загальн}}$  не підвищується. Що ж таке  $x$  в (5.14)?

$$x = \frac{c_2 (d_1 / 2 + d_2 + d_3 / 2)}{c_g d_2} \quad (4.15)$$

де  $(d_{1/2} + d_2 + d_{3/2})$  – відстань між серединними площинами зовнішніх шарів 1 і 3, розділених між собою шаром серцевини 2, м;

$d_1; d_2; d_3$  - товщини шарів 1; 2; 3 відповідно, м;  
 $c_2$  – швидкість поширення зсувної хвилі в 2-му шарі (серцевині). Вона може бути обчислена по формулі:

$$c_2 = \sqrt{G_2 d_2 / m_2}, \text{ м/с} \quad (4.16)$$

де  $G_2$  – динамічний модуль матеріалу шару 2 при зрушенні, Па;

$m_2$  – поверхнева щільність шару 2, кг/м<sup>2</sup>.

У забезпечення належних техніко-експлуатаційних характеристик потрібно дотриматися умови обмеження деформації конструкції:

$$w/l \leq 1/200 \quad (4.17)$$

де  $w$  - статичний прогин середини конструкції під дією власної ваги;  $l$  - проліт конструкції «сандвіча», м.

Практика показує, що найбільш слабе місце «сандвіча» - його серцевина, виконувана з матеріалів типу, що демпфірують, пінопластів, - на відміну від зовнішніх плит, що виготовляються, як правило, з металу, гіпсу, азбестоцементу й ін. Тому нас, у першу чергу, цікавить оптимальна товщина 2-го шару, м. Вона може бути знайдена, як:

$$d_2^2 \geq P l^2 / (E_2' d_2 [0,192 - 4,8 \beta_2 g l (x c_6)^{-2}]), \quad (4.18)$$

де  $P$  – вага конструкції панелі «сандвіч» шириною 1 м, Н/м:

$$P = m g l, \text{ Н/м;} \quad (4.19)$$

$m$  – поверхнева щільність, кг/м<sup>2</sup>;

$g = 9,81 \text{ м/с}^2 = \text{const}$  – прискорення вільного падіння;

$$\beta = G_2 / G_{2c}, \quad (4.20)$$

$G_2$ ;  $G_{2C}$  – відповідно, динамічний і статичний модулі матеріалу шару 2, Па;

$$E' = E(1-\mu^2);$$

$E$  і  $\mu$  – відповідно, модуль Юнга, Па; і коефіцієнт Пуассона «сандвіча».

Підбор оптимальних параметрів конструкції проектованої плити виконують у наступному порядку. Задавши значеннями  $x^2$  і  $f_{загальн}$ , знаходять граничну частоту зовнішньої панелі  $f_1$  відповідно до формули (4.11). (Звичайно 1-й і 3-й шари багатошарової панелі «сандвіч» виконані з однакових одношарових панелей рівної товщини; автоматично  $f_1 = f_3$ ). По формулі (4.13) визначають товщини зовнішніх (1-го і 3-го) шарів панелі  $d_1$ ;  $d_3$ . З умови (4.18) визначають товщину серцевини  $d_2$ . З рівняння

$$x^2 = G_2 d_2 \cdot g \cdot l / (P c_e^2) \quad (4.21)$$

визначають необхідне значення динамічного модуля пружності матеріалу  $G_2$  матеріали серцевини при зрушенні. Це дозволяє установити (підібрати відповідно до необхідного значення) найбільш придатний матеріал серцевини. У нормованому діапазоні частот повинна бути відсутня власна частота симетричних коливань плит «сандвіча», тобто виконуватися умова:

$$f_{власна} = 1 / (2\pi \sqrt{G_2 / (d_1 d_2 \rho_1)}) > 3200 \text{ Гц}. \quad (4.22)$$

При виконанні цієї умови запроектована звукоізолююча панель типу «сандвіч» вважається такою, що задовольняє обом конструктивним вимогам: вона забезпечує достатню твердість при зрушенні серцевини,



витримуючи умову обмеження деформації (4.17) і досить високу граничну частоту  $f_{\text{загальн}}$ , дотримуючи необхідну звукоізолюючу здатність.

Конструктивний розрахунок панелі на цьому можна було б закінчити; однак акустичний розрахунок був би не повним, - оскільки цікаво знати конкретну величину звукоізоляції запроєктованої конструкції  $R'_w$ , виражену в дБ. З обліком наших попередніх досліджень, нами (вперше в дійсній роботі) пропонується наступна методика її визначення.

1. Обчислюємо середню щільність «сандвічу»  $\rho_{\text{сеп}}$ , кг/м<sup>3</sup>. Середня щільність фізичного тіла, відповідно до визначення, це сума мас його складових частин  $\sum M_i$ , кг, - (для нашого випадку сума мас шарів  $\sum M_i = (M_1 + M_2 + M_3)$ ), ділена на загальний обсяг фізичного тіла  $V_{\text{загальн}} = \sum V_i$ , м<sup>3</sup>. У нашому випадку відомі геометричні параметри (стало бути, і обсяги) для кожного шару  $V_1$ ;  $V_2$ ;  $V_3$  багат шарової звукоізолюючої панелі типу «сандвіч»; і тип матеріалу (отже, щільності) кожного шару  $\rho_1$ ;  $\rho_2$ ;  $\rho_3$ , кг/м<sup>3</sup>.

$$\begin{aligned} \rho_{\text{сеп}} &= (\rho_1 \cdot V_1 + \rho_2 \cdot V_2 + \rho_3 \cdot V_3) / V_{\text{загальн}} = \\ &= (d_1 l \cdot b \cdot \rho_1 + d_2 l \cdot b \cdot \rho_2 + d_3 l \cdot b \cdot \rho_3) / ((d_1 + d_2 + d_3) l \cdot b) = \\ &= (d_1 \cdot \rho_1 + d_2 \cdot \rho_2 + d_3 \cdot \rho_3) / (d_1 + d_2 + d_3), \text{ кг/м}^3. \end{aligned} \quad (4.23)$$

Величини  $l$  і  $b$ , м в (4.23) – відповідно, довжина і ширина звукоізолюючої панелі.

2. Знаючи  $\rho_{\text{сеп}}$ , можна знайти середню поверхневу щільність матеріалу панелі «сандвіч»  $m$ , кг/м<sup>2</sup>

$$m = \rho_{\text{сеп}} / (d_1 + d_2 + d_3), \text{ кг/м}^2 \quad (4.24)$$

3. Середня власна звукоізоляція  $R'_w$ , дБ, багат шарової звукоізолюючої панелі типу «сандвіча» у нормованому діапазоні частот  $f_H \div f_B$ , Гц буде визначатися як середнє

значення значень звукоізолюючої здатності на її граничних частотах цього діапазону  $R'_w = (R_n + R_g) / 2$ , дБ; чи (при  $k = 1 \text{ м}^2 / (\text{кг} \cdot \text{Гц})$ ):

$$R'_w = ((20 \lg k \cdot m \cdot f_n - 47,5) + (20 \lg k \cdot m \cdot f_g - 47,5)) / 2, \text{ дБ}; \quad (4.25)$$

При підстановці чисельних значень нижньої граничної частоти  $f_n (=100 \text{ Гц})$  і верхньої граничної частоти  $f_g (=3200 \text{ Гц})$  нормованого діапазону (5.25) здобуває вид:

$$R'_w = (20 \lg m^2 + 15,1) / 2, \text{ дБ}. \quad (4.26)$$

#### **4.6. Програма для обчислення конструктивних параметрів багат шарових звукоізолюючих панелей типу «сандвіч» з використанням явища поляризації звуку**

Розрахунок конструктивних параметрів панелі «сандвіч» згідно з вище вказаними положеннями – порівняно складна математична задача, тому у подальший розвиток нами була розроблена комп'ютерна програма [127].

Ілюстративний матеріал, що представляє інтерфейс розробленої нами програми [127], наведений нижче.

В якості засобу програмування обрано “Visual Basic”. Програма може бути реалізована в рамках “Microsoft Excel”, що входить до складу відомого пакету “Microsoft Office” (настільні ПК або ноутбуки), або “Pocket Excel”, що застосується на кишенькових ПК. Як можливо бачити на рис. 6.2, представлена версія задля звичайної “Microsoft Excel” для користувачів із середньою технічною, або неповною вищою освітою. Для виконання комплексу складних і взаємопов'язаних розрахунків згідно з вищенаведеним алгоритмом потребується тільки ввести вихідні дані в комірки, що обведені рамкою.

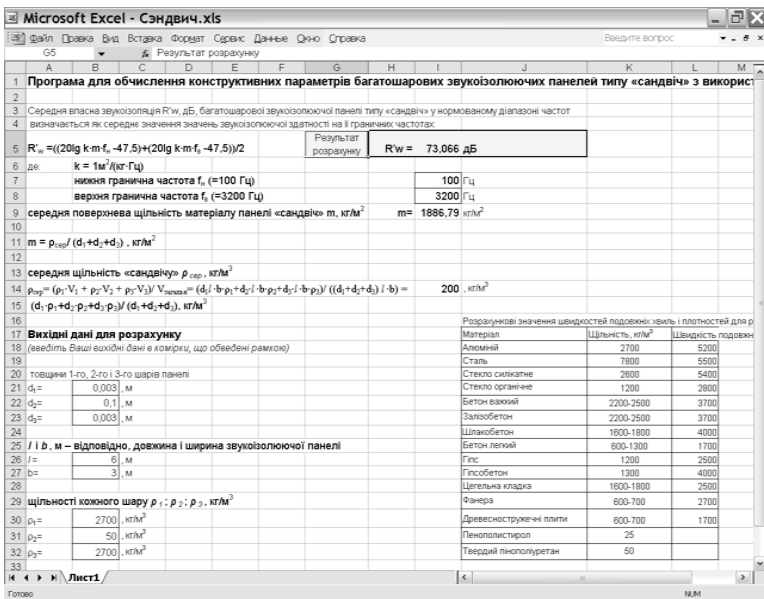


Рис. 4.3 – Інтерфейс розробленої програми:

а) - версія задля ноутбуків та настільних комп'ютерів;

б) версія задля кишенькових ПК (типу "Pocket PC")

Також представлена версія задля “Pocket Excel” для користувачів із середньою технічною, або неповною вищою освітою. Для виконання комплексу складних і взаємопов’язаних розрахунків згідно з вищенаведеним алгоритмом потребується тільки ввести вихідні дані в комірки, що обмежені рамкою.

#### **4.7. Застосування вакуумованих пристроїв для створення твердих звуконепроникнутих перешкод та спосіб оперативного регулювання часу реверберації звуку в приміщеннях**

Але ж як забезпечити непроникненість звуку в твердій зоні пропонувананих багатошарових панелей? Можна, звичайно, застосувати якісь тверді матеріали. Але ж будь-який твердий матеріал не є перешкодою до розповсюдження звуку. Тому наша увага звернулася до звукоізолюючих конструкцій, які містять всередині єдине середовище, що не пропускає звук – себто вакуум.

Наша розробка [128] відноситься до області архітектурно-будівельної акустики, а саме до технічних засобів, що дозволяють примусово й оперативно змінювати час реверберації звуку в приміщеннях. Реверберація - післязвучання, що зберігається після вимикання джерела звуку й обумовлене одночасним приходом у дане місце відбитих чи розсіяних звукових хвиль. Вона одним з основних функціональних параметрів приміщень суспільних будинків, і значно впливає на чутність мови і музики в них. Надлишковий час реверберації звуку приводить до неприємної гучності приміщення, недостатня реверберація - до різко уривчастого звучання, позбавленому музичної "соковитості". Таким чином у конструкціях різноманітних приміщень, а також конструкціях спеціально створюваних ревербераційних

камер виникає необхідність в регулюванні часу реверберації, для чого і може бути застосований запропонований спосіб.

Відомий спосіб оперативного регулювання часу реверберації звуку в приміщеннях, що полягає у зміні конфігурації і площі поверхонь, що відбивають звук, у таких приміщеннях, описаний в [129]. Цей спосіб послужив в якості прототипу для нашого оригінального винаходу [128].

Для облицювання приміщення можуть бути використані звукоізолюючі панелі, що містять вакуумовані порожнини: такі, як [130; 131; 132]. Застосування в якості облицювань, що відбивають звук, саме таких звукоізолюючих панелей з вакуумованими порожнинами є необхідною умовою для реалізації пропонованого нами способу.

Так, попередньо саме нами було розроблено «Звукоізолюючий елемент» згідно [112]. Вперше запропонований в кандидатській дисертації автора пристрій зменшення шуму відноситься до області технічних засобів боротьби із шумом на шляху його поширення та може бути використаний як перешкода на шляху поширення звуку у вигляді звукоізолюючого кожуха, шумозахисного екрана, що обгороджує конструкції будинку, спорудження, обшивання наземного, підземного, надводного, підвідного, повітряного чи космічного транспортного засобу й ін. [172].

Недоліком традиційних засобів звукоізоляції у вигляді одне- і багатошарових твердих перешкод на шляху поширення шуму є те, що звук, відповідно до свого визначення, являє собою гармонійні коливання часток пружного середовища [80], тобто механічну (пружну) хвилю, і з успіхом поширюється в будь-якому твердому,

рідкому чи газоподібному середовищі, що володіє властивістю пружності [173]. Очевидно, найкращою перешкодою на шляху поширення звуку (шуму) є середовище, що не володіє властивістю пружності, тобто вакуум [82]. Ця передумова послужила в якості вихідної при створенні звукоізолюючого елемента (див. рис. 4.4), що має цільний герметичний корпус I, (виготовлений, наприклад, із фторопласта, армованого металом), на лицьовій стороні якого нанесене додаткове звуковбирне покриття 2, з розміщеною на його тильній стороні прокладкою, що демпфірує, 3, монтажними болтами 4, що вставляються в наявні на кріпильних фланцях 5 кріпильні отвори 6, постачені втулками, що демпфірують, 7, які амортизують шайбами 8, установленими на монтажних болтах, клапан для забезпечення вакуумування 9, внутрішній вакуумований простір 10 і сполучний штуцер II, призначений для підключення зовнішньої апаратури для забезпечення вакуумування (не показана). Усередині простору 10 підтримується вакуум, характеристики якого підбирають виходячи з необхідної величини зниження шуму (звукоізолюючої здатності) даним елементом.

Розрахункова формула, виведена автором, дозволяє визначити величину тиску розрідженого газу  $P$ , Па усередині вакуумированной порожнини залежно від необхідної звукоізолюючої здатності  $R$ , дБ:

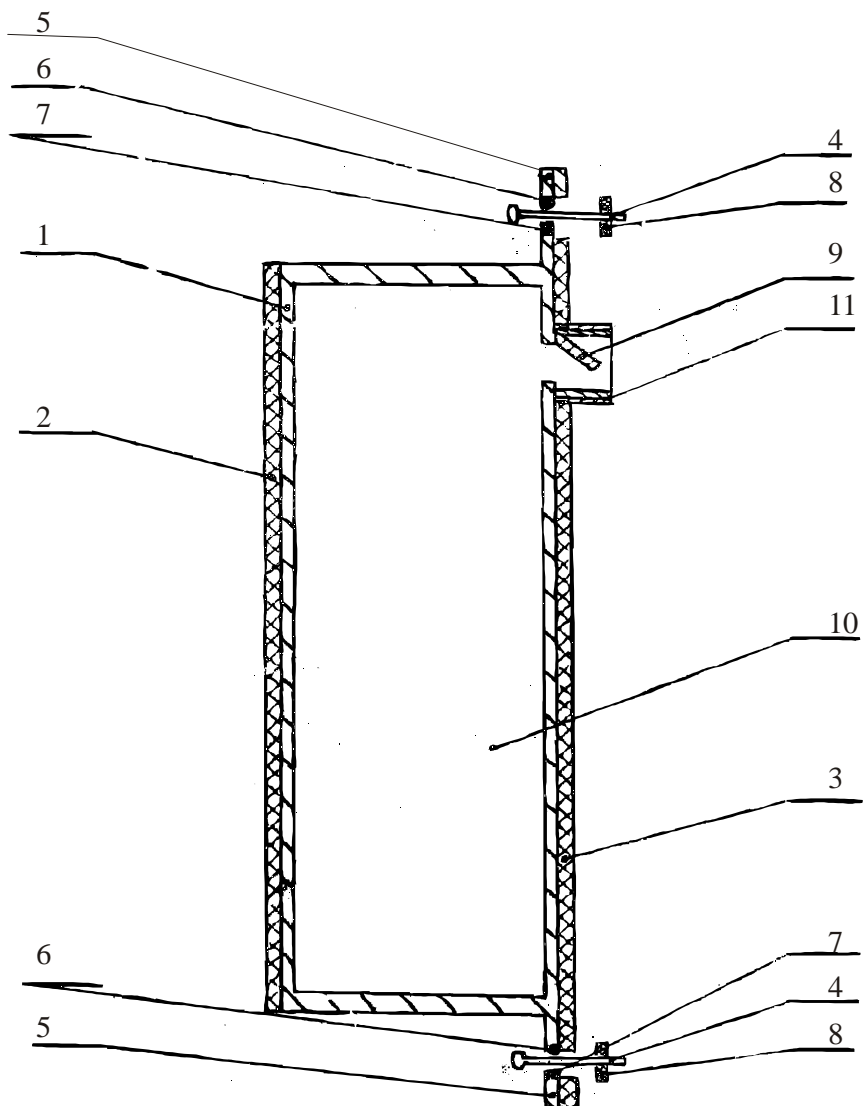
$$R = 10 \lg 131325/P, \text{ дБ.}$$

При різних тисках  $P$  усередині порожнини 10 звукоізолююча здатність  $R$  дорівнює:

$$P = 10,1 \text{ Па} \rightarrow R = 10 \lg 131325/10,1 = 10 \lg 10^4 = 40 \text{ дБ,}$$

$$P = 1,01 \text{ Па} \rightarrow R = 10 \lg 131325/1,01 = 10 \lg 10^5 = 50 \text{ дБ,}$$

$$P = 0,101 \text{ Па} \rightarrow R = 10 \lg 131325/0,101 = 10 \lg 10^6 = 60 \text{ дБ.}$$



*Рис. 4.4 – Звукоізолюючий елемент, розроблений та запатентований [172] автором раніше*

Виконання корпусу цільним, а не складеним забезпечує технічні переваги при експлуатації (легше

тривалий час підтримувати вакуум у ньому). Розташування прокладки, що демпфірує, поза герметичним корпусом забезпечує її власну високу звукоізолюючу здатність, при цьому вона закриває площу тильної грані корпуса.

Монтажні болти, встановлювані в отвори кріпильних фланців, постачених втулками, що демпфірують, і що мають шайби, що амортизують, утворюючи віброізолюючі вузли кріплення, що запобігають поширення структурного звуку на несучі конструкції.

Авторські права на описаний звукоізолюючий елемент на території України та Росії захищені патентним законодавством та належать автору.

Таким чином, варто вважати, що відомий спосіб оперативного регулювання часу реверберації звуку в приміщеннях, що облицьовують звукоізолюючими панелями, що містять вакуумовані порожнини, після чого змінюють конфігурацію і площу поверхонь, що відбивають звук, у таких приміщеннях, (що є прототипом запропонованого).

Цей відомий спосіб характеризується наступними недоліками: складність, непрактичність. Наприклад, зміна часу реверберації в великому залі, обладнаному описаним пристроєм для реалізації даного способу, вимагає наявності складних і громіздких механізмів для зміни конфігурації підвісної стелі, причому ця зміна конфігурації повинна бути здійснена безпосередньо під час представлення, і супроводжується, крім усього, значним шумом і вібрацією, що відволікає глядачів від сцени чи екрана, звертаючи їхню увагу на зміну конфігурації стелі. Зазначений приклад ілюструє такий недолік відомого способу, як його незручність застосування.



Цей відомий спосіб не вирішує задачу примусової зміни коефіцієнта пропущення звуку  $\tau$  через вакуумовану порожнину звукоізолюючих панелей (пристроїв для здійснення даного способу), якими облицюють приміщення - відповідно до прототипу  $\tau$  є постійною, а не змінною величиною.

Задачею розробки є забезпечення нескладної і зручної у користуванні можливості оперативного регулювання часу реверберації звуку в приміщеннях за рахунок зміни характеристик використовуваних для облицювання приміщення звукоізолюючих панелей з вакуумованими порожнинами [130; 131; 132].

Поставлена задача досягається тим, що спосіб оперативного регулювання часу реверберації звуку в приміщеннях, що облицовують звукоізолюючими панелями, що містять вакуумовані порожнини, відповідно до нашої пропозиції [128], передбачає два варіанти такого регулювання. Відповідно до першого з них здійснюють примусову зміну тиску газу, що знаходиться в зазначених вакуумованих порожнинах, наприклад, за допомогою додатково підключеного до них вакуумного насоса. Відповідно до другого з них здійснюють примусову зміну температури газу, що знаходиться в зазначених вакуумованих порожнинах, наприклад, за допомогою додатково введеного в конструкцію звукоізолюючих панелей теплообмінника. (На наш власний авторський погляд, перший спосіб більш зручніший та здібний до практичного застосування; другий має тільки-но інженерно-конструкторську зацікавленість.

Технічним результатом нашого винаходу [128] є спрощення і здешевлення маніпуляцій по оперативному

регулюванню часу реверберації звуку в приміщеннях.

Зміна температури чи тиску газу у вакуумованій порожнині звукоізолюючої панелі спричиняє зміну щільності газу; отже, як наслідок, стається зміна коефіцієнта  $\tau$  звуку, та відповідно, зміна коефіцієнта  $\alpha$  звукоізолюючих панелей, використовуваних для облицювання реверберуючого приміщення, що в остаточному підсумку веде до зміни часу реверберації звуку в такому приміщенні.

Сутність нашої пропозиції [128] полягає в наступному. Згідно [143, с. 248-249] час реверберації визначається по відомих формулах Ейрінга і Себіна (при малих значеннях  $\alpha$ ), - куди, як вище (в розділі 1) згадувалося, входять наступні величини:  $T$  - час реверберації, с;  $V$  - обсяг приміщення,  $\text{м}^3$ ;  $S$  - площа конструкцій приміщення, що обгороджують,  $\text{м}^2$ ;  $\alpha$  - коефіцієнт звукопоглинання поверхні, що характеризує втрати енергії на перетворення в тепло і пропущення (проходження через перешкоду). У дійсному описі коефіцієнт звукопоглинання поверхні виражений:

$$\alpha = \alpha' - \tau,$$

де  $\alpha'$ - коефіцієнт поглинання звуку, що характеризує тільки втрати енергії на перетворення в тепло і;  $\tau$  - коефіцієнт пропущення звуку, що характеризує тільки втрати енергії на проходження її через перешкоду наскрізь).

Таким чином, коефіцієнт звукопоглинання поверхні  $\alpha$  розділений на дві його складові - коефіцієнти  $\alpha'$  і  $\tau$ . Відповідно до винаходу, зміна обсягу приміщення  $V \text{ м}^3$ , і площі конструкцій приміщення, що обгороджують,  $S, \text{м}^2$ , не виконується, тому що не здійснюється зміна

конфігурації і площі поверхонь, що відбивають звук. Замість цього здійснюється зміна звукопоглинання  $\alpha$ , а саме його складової частини - коефіцієнта пропускання  $\tau$ . Ця зміна можлива, оскільки спосіб передбачає облицювання приміщення звукоізолюючими панелями, що утримують вакуумовані порожнини.

Згідно [104, с. 68, 493] інтенсивність звуку  $\epsilon$

$$I = \frac{\rho \cdot V^2 \cdot c}{2}, \text{ Вт/м}^2 \quad (4.27)$$

де  $\rho$  - щільність середовища поширення звуку,  $\text{кг/м}^3$ ;

$V$  - максимальне значення швидкості коливань частинок пружного середовища,  $\text{м/с}$ ,  $c$  - фазова швидкість хвилі (швидкість звуку),  $\text{м/с}$ .

Позначимо інтенсивність звукової хвилі, що падає на перешкоду як  $I_{\text{падіння}}$ , а інтенсивність звукової хвилі, що пройшла через перешкоду як  $I_{\text{пропускання}}$ , тобто  $\tau$  згідно [104] при підстановці в (4.27) складе:

$$\tau = I_{\text{пропускання}} / I_{\text{падіння}} = \frac{\rho_{\text{пропускання}} \cdot V_{\text{пропускання}}^2 \cdot c_{\text{пропускання}}}{\rho_{\text{падіння}} \cdot V_{\text{падіння}}^2 \cdot c_{\text{падіння}}} \quad (4.28)$$

При тому за

(4.27)

$$I_{\text{падіння}} = \frac{\rho_{\text{падіння}} \cdot V_{\text{падіння}}^2 \cdot c_{\text{падіння}}}{2}, \text{ Вт/м}^2; \quad (4.29)$$

$$I_{\text{пропускання}} = \frac{\rho_{\text{пропускання}} \cdot V_{\text{пропускання}}^2 \cdot c_{\text{пропускання}}}{2}, \text{ Вт/м}^2, \quad (4.30)$$

де індекси при величинах, що входять у вищевказані формули (4.29) і (4.30) характеризують: індекс *падіння* - звукову хвилю, що падає на перешкоду, середовищем поширення якої є атмосферне повітря, що знаходиться в

приміщенні, що випробує реверберацію, індекс *пропущення* - звукову хвилю, що пройшла через перешкоду, середовищем поширення якої є розріджений газ у вакуумованій порожнині звукоізолюючої панелі, що використана в якості облицювання приміщення, що випробує реверберацію. При цьому величини максимального значення швидкості коливань часток пружного середовища  $V_{\text{падіння}}$  і  $V_{\text{пропущення}}$ , що характеризують імпульс, що перенесений звуковою хвилею, однакові  $V_{\text{падіння}} = V_{\text{пропущення}}$ . Різняться щільності середовища поширення - щільність атмосферного повітря  $\rho_{\text{падіння}}$  і щільність розрідженого газу у вакуумованій порожнині звукоізолюючої панелі  $\rho_{\text{пропущення}}$ , а також швидкості  $c_{\text{падіння}}$  і  $c_{\text{пропущення}}$  (швидкість звуку в газах є функцією його щільності), причому  $\rho_{\text{падіння}} > \rho_{\text{пропущення}}$ . Запишемо (4.28) як

$$\tau = I_{\text{пропущення}} / I_{\text{падіння}} = \frac{\rho_{\text{пропущення}} \cdot c_{\text{пропущення}}}{\rho_{\text{падіння}} \cdot c_{\text{падіння}}} \quad (4.31)$$

За рахунок того, що  $\rho_{\text{падіння}} > \rho_{\text{пропущення}}$ ,  $I_{\text{пропущення}} < I_{\text{падіння}}$  (тобто пояснений механізм дії звукоізолюючих панелей, що містять вакуумовані порожнини), тобто в таких панелях має місце зниження інтенсивності минаючого через них звуку. Згідно [99, с. 154, 249, 253] щільність газу  $\rho$  визначається як

$$\rho = P / (R \cdot T), \quad (4.32-a)$$

де  $P$  – тиск газу, Па;  $T$  - температура газу, К;  $R$  – газова постійна, Дж/(кг · К).

За (6.32-а) запишемо щільності  $\rho$  для обох ситуацій як:

$$\rho_{\text{падіння}} = \frac{P_{\text{падіння}}}{R_{\text{падіння}} \cdot T_{\text{падіння}}} ; \quad (4.32-б)$$

$$\rho_{\text{пропущення}} = \frac{P_{\text{пропущення}}}{R_{\text{пропущення}} \cdot T_{\text{пропущення}}} . \quad (4.32-в)$$

Згідно [99, с. 154, 249, 253] швидкість звуку в газі (чи фазова швидкість)  $c$ :

$$c = \sqrt{\frac{\kappa R}{\rho}} = \sqrt{\kappa R T} , \text{ м/с.} \quad (4.33-а)$$

де  $\kappa$  – показник адіабати.

Виходячи з (4.33-а), запишемо швидкість звуку в атмосферному повітрі:

$$c_{\text{падіння}} = \sqrt{\kappa_{\text{падіння}} R_{\text{падіння}} T_{\text{падіння}}} , \text{ м/с,} \quad (4.33-б)$$

та швидкість звуку в розрідженому газі, що заповнює вакуумовану порожнину:

$$c_{\text{пропущення}} = \sqrt{\kappa_{\text{пропущення}} R_{\text{пропущення}} T_{\text{пропущення}}} , \text{ м/с.} \quad (4.33-в)$$

Підставивши (4.32-б), (4.32-в), (4.33-б), (4.33-в) у формулу (4.31):

$$\tau = I_{\text{пропущення}} / I_{\text{падіння}} = \frac{\rho_{\text{пропущення}} \cdot c_{\text{пропущення}}}{\rho_{\text{падіння}} \cdot c_{\text{падіння}}} \quad (4.34)$$

Якщо вакуумована порожнина заповнена тим же самим газом, що й атмосферне повітря (а технологія виробництва звукоізолюючих панелей не передбачає заповнення їх іншим газом), газові постійні однакові  $R_{\text{падіння}} = R_{\text{пропущення}}$  і показники адіабати також однакові  $\kappa_{\text{падіння}} = \kappa_{\text{пропущення}}$

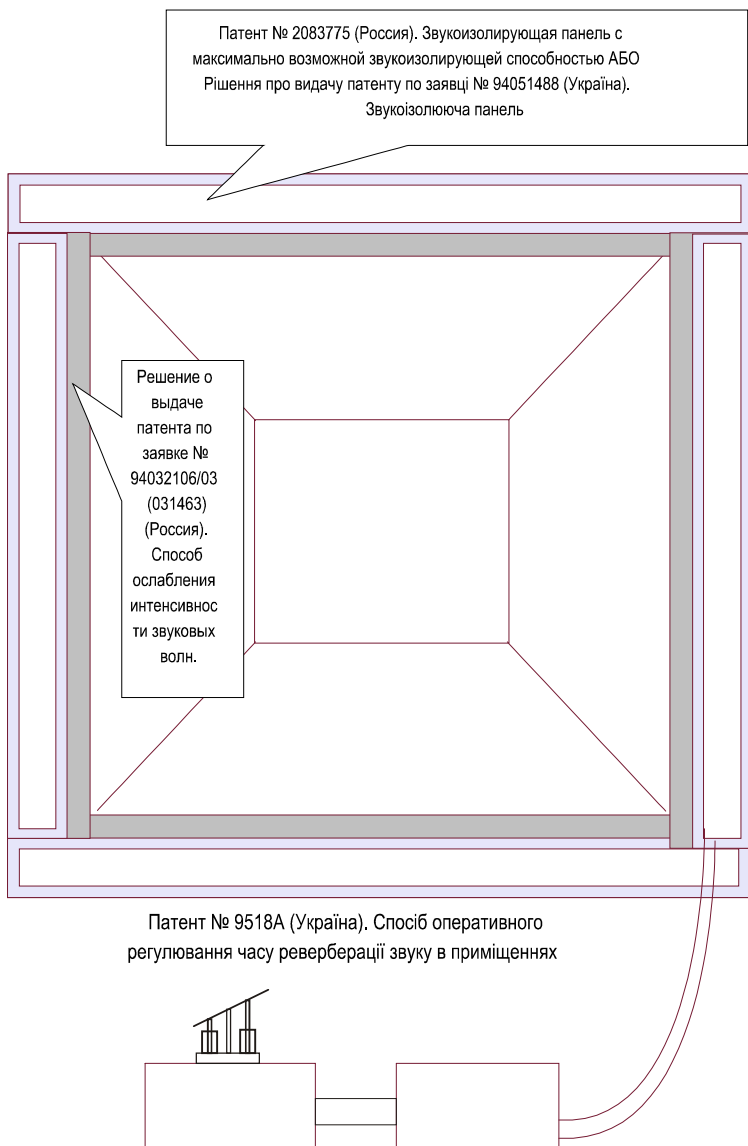
Якщо газу різні, усе рівно відношення  $P_{\text{падіння}}/P_{\text{пропущення}}$   
 $= \text{const і } \frac{T_{\text{падіння}} \sqrt{T_{\text{пропущення}}}}{T_{\text{пропущення}} \sqrt{T_{\text{падіння}}}} = \text{const}$ , тобто являють собою  
 постійну величину. Таким чином, вираз (4.34) описує  
 фізичний зміст процесу. Виходячи з (4.34), змінити  
 інтенсивність звукової хвилі, що пройшла через  
 вакуумовану порожнину звукоізолюючої панелі  $I_{\text{пропущення}}$ ,  
 у відношенні до вихідної інтенсивності хвилі, що падає  
 (що поширюється у атмосферному повітрі приміщення, що  
 випробує реверберацію,  $I_{\text{падіння}}$ , відповідно змінити  
 коефіцієнт пропущення  $\tau$ , відповідно змінити час  
 реверберації за формулами Ейрінга та Себіна можна двома  
 шляхами:

1) зміною тиску у вакуумованій порожнині,  $P_{\text{пропущення}}$   
 стосовно атмосферного  $P_{\text{падіння}}$ ,

2) зміною температури у внутрішній порожнині  
 звукоізолюючих пристроїв.

Пропонований спосіб реалізується таким чином.  
 Приміщення, у якому необхідно здійснювати оперативне  
 регулювання часу реверберації, наприклад, ревербераційну  
 камеру, зоровий зал, кінотеатр чи дискотеку та ін.,  
 облицьовують звукоізолюючими панелями, що містять  
 вакуумовані порожнини. Для регулювання часу  
 реверберації звуку змінюють тиск розрідженого газу у  
 вакуумованих порожнинах цих панелей за допомогою  
 підключеного до них вакуумного насоса - пристрою для  
 видалення газів і пар із судин, (або змінюють температуру  
 цього газу за допомогою теплообмінників, що знаходиться  
 у вакуумованих порожнинах цих панелей - апаратів для  
 передачі тепла від середовища з більш високою

температурою (тіла, що гріє - теплоносія) до середовища з більш низькою температурою (тіла, що нагрівається)). Вакуумні насоси і теплообмінники відомі [104] і підключення їх до вакуумованих порожнин звукоізолюючих панелей, якими облицьоване приміщення, не складає праці. При цьому змінюється коефіцієнт пропущення звуку  $\tau$ , відповідно, коефіцієнт звукопоглинання  $\alpha$ , відповідно час реверберації звуку в приміщенні. За рахунок підбора необхідного сполучення тиску і температури підбирають необхідний час реверберації звуку. При цьому з'являється можливість забезпечити різний час реверберації в різних частинах того самого приміщення, наприклад, за рахунок того, що у вакуумованих порожнинах звукоізолюючих панелей, якими облицьована одна стіна приміщення, підтримується одна величина тиску газу, а в порожнинах панелей, якими облицьована інша стіна приміщення – інша величина тиску газу, відмінна від її. Можливість швидкої зміни тисків і температур забезпечує досягнення незвичайних звукових звуку в ефектів у приміщенні, зв'язаних з різкою зміною часу реверберації в ньому. Опис винаходу наведено в [128].



*Рис. 4.5 – Застосування винаходів автора в реалізації способу оперативного регулювання часу реверберації звуку в приміщеннях [128]. Застосовані [102, 130]*



Резюмуючи вищевказане, можна казати так: вакуум - краща перешкода на шляху звуку. Це, у принципі, було давним-давно відомо й без нас: однак ми відбили це чисельно (залежність між тиском (і іншими параметрами) розрідженого газу й звукоізолюючою здатністю).

#### **4.8. Багаторазові відбиття та самоузгодження хвильового поля при розповсюдженні між двома шарами матеріалу**

Тут виникає ще одно цікаве явище. В якості внутрішнього середовища в [130, 131, 132] застосований вакуум, що не пропускає звук. Між тим, конструкції різного роду звукозахисних пристроїв, що містять всередині вакуум, були відомі ще задовго до [130, 132]))? Але досягнути саме максимальної звукоізолюючої здатності вони виявилися не в змозі. Слабким місцем тих конструкцій є проходження структурного звуку в конструкціях корпусу (або оболонки), що містить вакуум. Звук, дійсно, зовсім не проходить крізь вакуумований простір, - зате проходить повз нього по твердому середовищу його оболонки. Наявність такого обхідного шляху нівелює всі переваги затримання звуку вакуумом у внутрішній порожнині, - бо принципово неможливо утворити таку порожнину без її оболонки? Таким чином, є потреба в зменшенні структурного звуку на стінках [133].

Між тим, в конструкції панелі [130] переборено упередження фахівців про неможливість досягнення такого вагомого, граничного технічного результату, як *максимально можлива* звукоізолююча здібність. Але ж чим відрізняється, наприклад, [130], від інших своїх аналогів, наприклад, [132], що також застосують вакуум задля підвищення своєї звукоізолюючої здатності?

Умови технічного завдання зменшення структурного шуму в оболонці вакуумованої порожнини полягали в тому, що звукова хвиля падає з атмосферного повітря під кутом  $\Theta$  на поверхню звукоізолюючої конструкції, що складається з декількох шарів матеріалу, при тому третій шар матеріалу є таким, що абсолютно відбиває. Потребується зменшити проходження структурного звуку в першому та другому шарах матеріалу [133]. Такій умові, наприклад, відповідає конструкція [130], що має стінки з твердого матеріалу (шар 2, (а також і шар 4)), між якими міститься вакуум (шар 3). На передній поверхні стінки, згідно за формулою винаходу, нанесене додаткове звукопоглинаюче покриття (шар 1).

Таким чином, конструкція поверхні, куди влучає звукова хвиля, має три шари: звукопоглинаюче покриття (перший шар; індекс  $_1$ ); твердий матеріал (другий шар; індекс  $_2$ ); вакуум (третій шар; індекс  $_3$ ). Звукові хвилі в вакуумі не розповсюджуються, тобто третій шар є таким, що абсолютно відбиває всю енергію звукової хвилі. Товщини шарів позначені як  $d_1, d_2, d_3$ ; (при тому товщина  $d_3$  для розглядуваного в цій главі випадку не відіграє ролі; (але: за формулою винаходу [130] у внутрішній порожнині панелі забезпечена наявність середнього вакууму, що характеризується рівністю чи незначним перевищенням довжини вільного пробігу молекул  $l$  над найменшою відстанню  $d_3$  між стінками внутрішньої порожнини)).

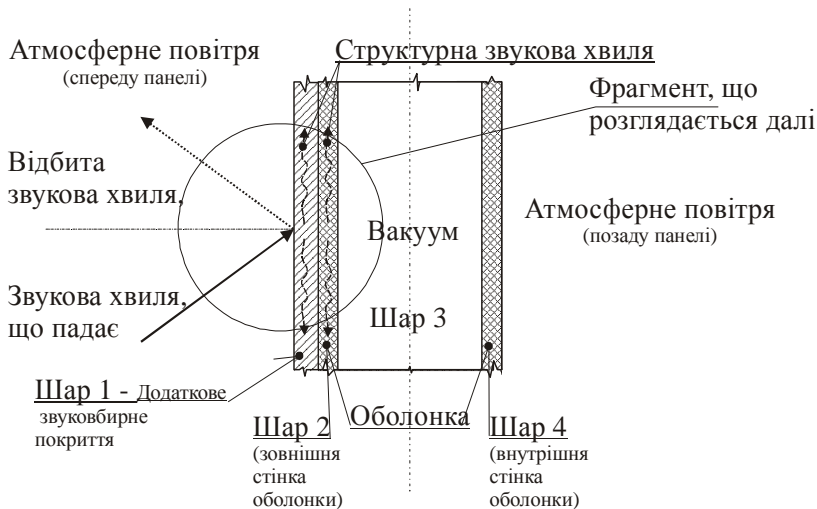


Рис. 4.6 – Фрагмент звукоізолюючої панелі з максимально можливою звукоізолюючою здатністю [130] в поперечному розтині. З такої чотирьохшарової конструкції далі розглядаємо тільки половину (шари 1-3), оскільки джерело шуму знаходиться із одного боку панелі; а з іншого – об’єкт, що захищається; і зворотний напрям (у т.ч. шар 4 – зворотний бік оболонки, що показані на кресленні, та дійсно необхідні задля зберігання вакууму) нас не цікавить. В будь-якому разі вакуум (шар 3) затримує звук всередині. Мова в цій роботі йде про зменшення саме структурного звуку на стінках корпусу

Якщо амплітуда звукового тиску в хвилі, що падає, дорівнює  $P_{\text{початк}}$ , то при перетинанні першої границі розподілу середовищ, тобто при падінні з повітря на шар 1 (початок тривимірної системи координат  $ХОУ$  розташовано на границі розподілу середовищ 2 та 3, оскільки  $d_3$  тут не відіграє ролі):

$$P_{1\text{пад}} = P_{\text{початк}} \cdot e^{i \cdot k_0 \cdot (-x \cdot \sin \Theta + y \cdot \cos \Theta)},$$

$$P_{1\text{відб}} = \rho_1 \cdot P_{\text{початк}} \cdot e^{i \cdot k_0 \cdot (-x \cdot \sin \Theta - y \cdot \cos \Theta)},$$

$$P_{1\text{проп}} = \tau_1 \cdot P_{\text{початк}} \cdot e^{i \cdot k_0 \cdot (-x \cdot \sin \Theta + y \cdot \cos \Theta)}$$

Несуттєве зауваження:  $P_{1\text{пад}}$  та  $P_{1\text{відб}}$  розповсюджуються попереду границі розподілу «повітря –

шар 1»; а  $P_{1\text{проп}}$  - позаду неї, тобто у шарі 1. За аналогією,  $P_{2\text{пад}}$  ( $= P_{1\text{проп}}$ ) та  $P_{2\text{відб}}$  розповсюджуються попереду границі розподілу «шар 1 – шар 2», тобто в шарі 1; а  $P_{2\text{проп}}$  - позаду неї, тобто у шарі 2.  $P_{3\text{пад}}$  ( $= P_{2\text{проп}}$ ) та  $P_{3\text{відб}}$  розповсюджуються попереду границі розподілу «шар 2 – шар 3», тобто в шарі 1; а  $P_{3\text{проп}}$  (що дорівнює 0) - позаду неї, тобто у шарі 3.

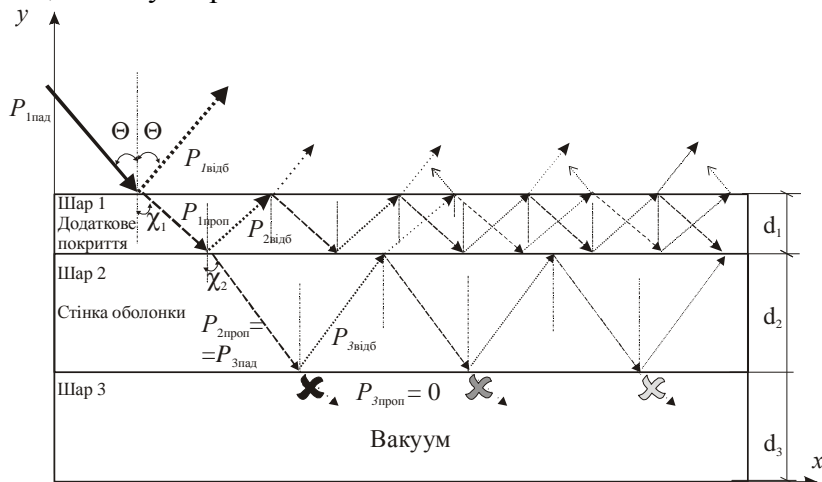


Рис. 4.7 – Складна хвильова картина всередині стінок [130]. Всього одна хвиля, що падає, розбивається на значну кількість пропущених, переломлених, відбитих компонент. Багаторазові відбиття проходять в межах шарів 1 та 2

Яким чином будуть розповсюджуватися звукові хвилі в шарі 1? Тут хвильове поле, за аналогією за попередніми побудовами, сформує хвилі  $P_{2\text{пад}}$ ,  $P_{2\text{відб}}$ , та їхні наступні багаторазові відбиття. При тому  $P_{2\text{пад}} = P_{1\text{проп}}$  (зادля спрощення ми відкидаємо надмірне позначення  $P_{2\text{пад}}$  - воно зайве). Компонент  $P_{2\text{проп}}$  пройде крізь границю розподілу. На другій границі розподілу «шар 1- шар 2» усередині твердого матеріалу корпусу процес відбувається повторно;

та хвильове поле в шарі 2 сформуєть хвилі  $P_{\text{зпад}}$ ,  $P_{\text{звідб}}$ .  
При тому

$$P_{\text{зпад}} = P_{\text{2проп}}.$$

$P_{\text{2проп}}$  буде дорівнювати 0, оскільки третій шар являє собою вакуум, і звукові хвилі, як відомо, в ньому не розповсюджуються.

$$P_{\text{звідб}} = \tau_1 \cdot P_{\text{початк}} \cdot e^{i \cdot k_0 (-x \cdot \sin \Theta - y \cos \Theta)}.$$

Іншим чином,  $P_{\text{звідб}} = P_{\text{2пад}}$ , тобто це означає, що цей компонент хвилі, що пропущений скрізь шар 1 в товщу шару 2, але повністю відбитий від шару 3, містить в собі всю енергію звукової хвилі.

Розглянемо далі, що ж з ним станеться? При тому координата по осі  $y = d_2$ :

$$\begin{aligned} P_{\text{2проп}}(y = d_2) &= \tau_1 \cdot P_{\text{початк}} \cdot e^{i \cdot k_0 (-x \cdot \sin \Theta + y \cos \Theta)}; \\ P_{\text{звідб}}(y = d_2) &= \tau_1 \cdot P_{\text{початк}} \cdot e^{i \cdot k_0 (-x \cdot \sin \Theta - y \cos \Theta)}. \end{aligned}$$

Чому ж ми спочатку кажемо, що  $P_{\text{звідб}} = P_{\text{2проп}}$ , а потім розрізняємо їх між собою? Справа в тому, що ми розглядаємо не короткочасний звуковий імпульс, а надходження звукової енергії у шари панелі протягом деякого проміжку часу. При тому  $P_{\text{звідб}}$  характеризує енергію попередньої хвилі, а  $P_{\text{2проп}}$  - наступної; вони рівні між собою, це природно; але ж вони існують одночасно, доки  $P_{\text{звідб}}$  не згасла, а  $P_{\text{2проп}}$  ще надходить; отже, вони накладаються одна на одну, та взаємодіють?!

Якщо розглянути відношення цих хвиль для площини  $y = d_2$ , то можемо одержати:

$$P_{\text{звідб}} / P_{\text{2проп}} = e^{-z \cdot i \cdot k_0 \cdot d_2 \cdot \cos \Theta}.$$

Згідно визначення, відношення відбитої енергії хвилі до тієї енергії, що падає, є коефіцієнт відбиття. Отже, ми

одержали коефіцієнт відбиття в площині  $d_2$ , тобто в шарі 2. Модуль коефіцієнта, що одержаний, дорівнює одиниці, а фаза компоненти хвилі в шарі 2:

$$\varphi = 2 \cdot k_0 \cdot d_2 \cdot \cos \Theta.$$

Це являє собою накладання фаз при розповсюдженні хвилі в хвильовому проміжку, тобто від поверхні  $y=0$  (границя розподілу середовищ "шар 2 - шар 3" до границі розподілу "шар 1 - шар 2" ( $y=d_2$ ) и в зворотному напрямку, після відбиття від границі "шар 1 - шар 2". Промінь випробує багаторазове відбиття, та при тому, природно, переміщується вздовж осі  $x$ . Таке переміщення визначається як

$$\Delta = \frac{\partial \varphi}{\partial k x_x};$$

$$\varphi = 2 \cdot k_2 \cdot d_2,$$

$$\frac{\partial \left( \sqrt{k_0^2 - k_x^2} \right)}{\partial k x_x} = y \cdot d_2 \cdot \operatorname{tg} \Theta.$$

При геометричній побудові виходить точно такий же результат, тобто

$$\Delta = y \cdot d_2 \cdot \operatorname{tg} \Theta.$$

Адекватні результати при вивченні подібного явища одержані іншими дослідниками [134], [135]; а також [136].

Можливо підібрати товщину шару  $d_2$  таким чином, щоб промінь  $P_{\text{звідб}}$ , при зворотному русі всередині шару 2, влучив у вузол коливань шару  $d_1$ . Це буде залежати, насамперед, від первісного куту падіння  $\Theta$  на границю "*повітря - шар 1*", кутів переломлення  $\chi_1$  та  $\chi_2$  на границях розподілу середовищ "*повітря - шар 1*"; "*шар 1 - шар 2*".

Якщо шар 2 має однакову товщину, тобто поверхні шарів 1 та 3 паралельні, одержимо повторне влучення повторно відбитого променю у відповідний вузол. Слово «кожний», звісно, до цих «променів» та «вузлів» не застосовуване: (з нашого рис. 2 явно випливає що лише третій з відбитих променів в шарі 2 влучає в місце влучення четвертого відбитого променю в шарі 1. Це обумовлено тим, що кут первісного падіння  $\Theta$  та кути падіння на кожную подальшу границю розподілу не рівні між собою; то є загальновідомі наслідки закону Снеліуса). Але все ж таки має місце таке влучання деяких променів; завдання конструктора звукоізолюючого засобу – зробити їх як можна частішими?!

Ці ділянки (тобто самі місця вузлів коливань) не випробують коливань; коливання (у формі вигинових та інших форм хвиль йдуть по шару 1 в інших місцях (між вузлами). Таким чином, інтерференційні явища, тобто збільшення/зменшення коливань шару 1, не будуть мати місце.

Хвиля, що туди падає, відбиватиметься назад із тією ж амплітудою та фазою. Це є самоузгодження хвильових полів, що призводить до виникнення хвиль, що стоять, із неминучими резонансними явищами в товщі шару 2, - і, в кінцевому разі - до збільшення щільності звукової енергії.

Це є керований процес, а примусове управління їм здійснюється за рахунок підбору товщі шару  $d_2$ . При різній товщині шару  $d_2$  місце відбиття променю знаходиться у відповідних різних місцях границі розподілу середовищ "шар 2 - шар 3", змінюючись за координатою по осі  $x$ .

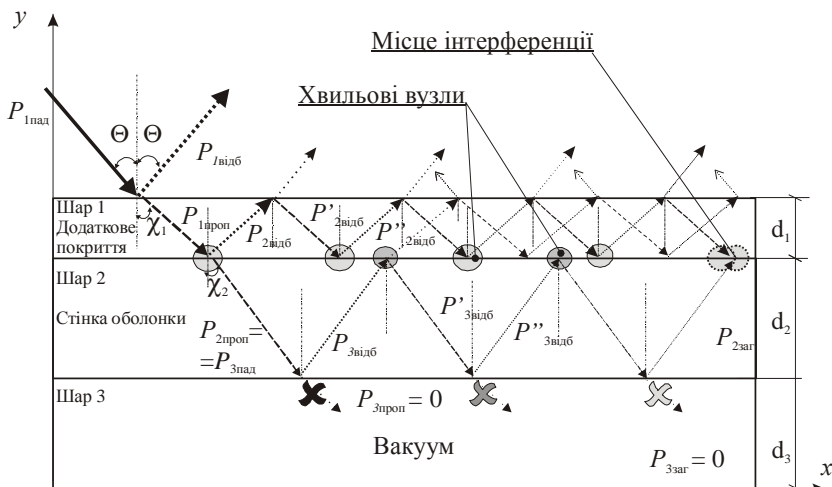


Рис. 4.8 – Самоузгодження хвильових полів в середньому шарі тришарової конструкції за рахунок накладення різних відбитих променів один на одного

Амплітудні характеристики звуку в шарі 2 визначаються амплітудними характеристиками  $P_{2\text{проп}}$  та  $P_{2\text{відб}}$ . Загальна амплітудна характеристика  $P_{2\text{заг}}$ , розрахована із зменшенням  $P_{2\text{відб}}$  при кожному повторному відбитті ( $P'_{2\text{відб}}$ ;  $P''_{2\text{відб}}$ ; ...) за рахунок інтерференційних явищ (влучення в місця попадання променів ( $P'_{1\text{відб}}$ ;  $P''_{1\text{відб}}$ );

$$P_{2\text{заг}} = P_{2\text{проп}} + P_{2\text{відб}} = \\ = \tau_1 \cdot P_{\text{початк}} [ e^{i \cdot k_0 \cdot (-x \cdot \sin \Theta + y \cdot \cos \Theta)} + e^{i \cdot k_0 \cdot (x \cdot \sin \Theta + y \cdot \cos \Theta)} ] ;$$

$$P_{2\text{заг}} = \tau_1 \cdot P_{\text{початк}} \cdot e^{-i \cdot k_0 \cdot x \cdot \sin \Theta} [ e^{i \cdot k_0 \cdot y \cdot \cos \Theta} + e^{-i \cdot k_0 \cdot y \cdot \cos \Theta} ] ;$$

$$P_{2\text{заг}} = 2 \cdot \tau_1 \cdot P_{\text{початк}} \cdot \cos \theta (k_0 \cdot y \cdot \cos \theta) \cdot k_0 \cdot d_2 \cdot \cos \theta \cos(k_0 \cdot y \cdot \cos \theta) \cdot \\ e^{-i \cdot k_0 \cdot x \cdot \sin \Theta} = P_{(y)} \cdot e^{-i \cdot k_0 \cdot x \cdot \sin \Theta} .$$

Таким чином, амплітудні параметри звукової хвилі всередині шару твердого матеріалу 2 є функцією просторової координати  $y$ . Щоб знайти екстремальне значення цієї амплітуди, проводимо диференціювання за  $y$ :



$$\frac{\partial P(y)}{\partial y} = -2 \cdot \tau_1 \cdot k_0 \cdot P_{\text{початк}} \cdot \cos\theta \cdot \sin(k_0 \cdot y \cdot \cos\theta)$$

Для умови екстремуму

$$\frac{\partial P(y)}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial P(y)}{\partial y} = -2 \cdot \tau_1 \cdot k_0 \cdot P_{\text{початк}} \cdot \cos\theta \cdot \sin(k_0 \cdot y \cdot \cos\theta) = 0$$

$$\sin(k_0 \cdot y \cdot \cos\theta) = 0$$

Умова максимуму амплітуди

$$k_0 \cdot y \cdot \cos\theta = \pi \cdot K,$$

де  $K$  – будь-яке ціле число: ( $K = 0; 1; 2; 3; \dots n$ ) – (що являє собою умову інтерференції).

Задля знайдення кута повного внутрішнього відбиття хвилі  $\theta = \theta_{\text{граничне}}$  необхідно дорівняти  $y = d_2$ :

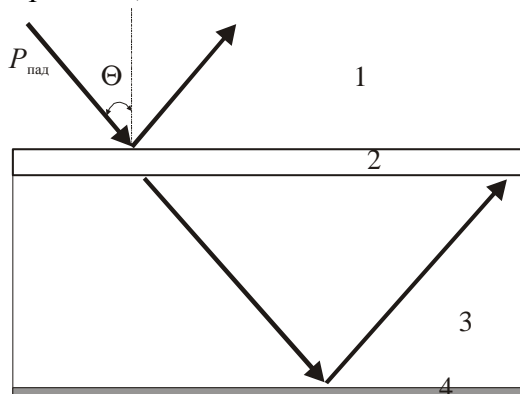
$$k_0 \cdot d_2 \cdot \cos\theta = \pi \cdot K$$

$$k_0 \cdot d_2 \cdot \cos\theta = \cos\theta \frac{\pi \cdot \hat{E}}{k_0 \cdot d_2}$$

Взаємозв'язок кута падіння і кута переломлення при повному внутрішньому відбитті хвиль (в загальному вигляді) описано в роботах [85, 113, 137]

Російський дослідник А.А. Кочкін вирішував завдання, що має деяку віддалену аналогію з нашим – а саме – досліджує самоузгодження хвильового поля в заповненому атмосферним повітрям проміжку між двома шарами твердого матеріалу. При тому в роботі [136], наприклад, її автор будує саме якусь умовну модель на підставі уявлень, не в змозі наділити її наведеними нами раніше реальними властивостями. Він досліджує

самоузгодження хвильового поля в повітряному проміжку всередині тришарової конструкції, перший шар якої - тверде середовище (в нашій реальній, а не гіпотетичній моделі це шар твердого матеріалу 1); другий шар (як це впливає з самої назви [136]) - повітря (в нашій реальній моделі еквівалентом його є шар 2 твердого матеріалу, з якого виготовлений корпус [130]); третій шар (в нашій реальній моделі еквівалентом якого є вакуум у внутрішньому просторі [130] згідно з запатентованою в 1997 р. формулою винаходу) автор [136] при побудові його моделі досліджень іменує "поверхність ... абсолютно отражающая" (але, на відміну від нас, він ніяк не пояснює, що ж це може значити, не наділяє свою "абсолютно отражающую поверхность" реальним змістом. Тому тут ми використаємо для викладок [136] саме термін "умопобудови"; це не є наміром якось образити автора [136]).



*Рис. 4.9 – Розрахункова схема досліджень А. А. Кочкина, в деякому віддаленому ступені еквівалентних нашим:*

*1 – атмосферне повітря; 2 – «пластина в формі полоси» (еквівалент шару 1 твердого матеріалу в наших дослідженнях); 3 – «воздушний проміжок» (еквівалент шару 2 твердого матеріалу в наших дослідженнях); 4 – «абсолютно отражающая поверхность» (еквівалент шару 3 (вакуум) в наших дослідженнях)*

За рахунок підбору товщини повітряного проміжку А. А. Кочкін також досягає самоузгодження хвильового поля в ньому.

Незважаючи на такі значні відмінності (насамперед, шар повітря [136] в тришаровій конструкції замість нашого шару твердого матеріалу 2), результат теоретичних побудов [136] збігається з нашим. Таким чином, на підставі власних досліджень, а також адекватного ствердження незалежного дослідження А.А. Кочкіна, можна констатувати, що самоузгодження хвильового поля в проміжку між двома шарами матеріалу, при дотриманні вищеназваних умов, цілком можливе та може бути досягнуто. За рахунок того само узгодження значно зменшується частка структурного звуку в елементах конструкції, і, таким чином, підвищується її звукоізолююча здатність. Це в офіційному порядку зафіксовано патентом Росії [130].

#### **4.9. Теза про обов'язкову сумісну дію звукопоглинання та звукоізоляції**

Попереду викладено теоретичні посилення автора задля створення високоефективних шумозахисних пристроїв. Згідно із ГОСТ 12.0.003-74\* [7] багато з них можуть бути класифіковані не інакше, як засоби звукоізоляції.

З числа перерахованих на рис. 4.10 засобів боротьби із шумом найбільш широку область застосування мають засоби звукоізоляції [138, 139] та звукопоглинання [140, 141].

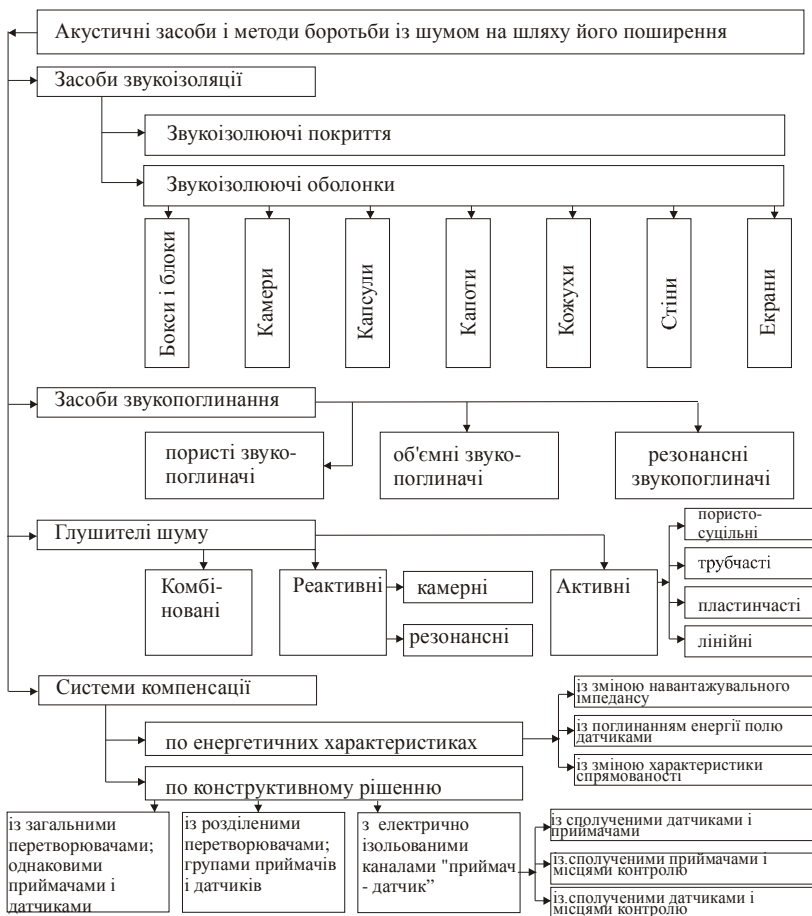


Рис. 4.10 – Класифікація акустичних засобів колективного захисту від шуму на шляху його поширення залежно від способу реалізації відповідно до класифікації ГОСТ 12.1.029-80

При їхньому дослідженні, кількісній оцінці ефективності, розробці і т.д. також доцільно застосовувати моделювання з використанням методу аналогії. В даний час відомо дві групи таких звукоізолюючих пристроїв, що розрізняються між собою за конструктивним виконанням, а саме: оболонки незалежної від джерел шуму (ДШ)

конструкції з повітряним проміжком між ним і оболонкою у вигляді звукоізолюючих: панелей, боксів із блоків, камер, капотів, капсул, кожухів, стін, екранів і ін.; та звукоізолюючі покриття, конструкції яких механічно зв'язані з ДШ і є його невід'ємною складовою частиною, упритул прилягають до ДШ без повітряного проміжку, що наносяться прямо на нього, з незмінною формою, що повторює форму ДШ [142]. І ті, й інші розглядаються далі.

Однак звукоізоляція не є єдиним способом захисту від шуму. Іншим, важливим та дієвим способом боротьби із шумом є звукопоглинання.

Варто мати на увазі, однак же, що сутність звукоізоляції полягає саме у **відбитті звуку**. Закон збереження енергії при падінні звукової хвилі на перешкоду може бути виражений як сума коефіцієнтів поглинання  $\alpha$ , відбиття  $\rho$  і пропущення звуку  $\tau$ , рівна 1:

$$\alpha + \rho + \tau = 1.$$

Це положення щонайкраще пояснене автором в своїй попередній роботі [137] на с. 35.

Звукоізоляція має на меті максимальним образом підвищити коефіцієнт відбиття звуку  $\rho$  за рахунок мінімізації коефіцієнта пропущення  $\tau$  через таку звукоізолюючу конструкцію при порівняно невисокому коефіцієнті поглинання звуку  $\alpha$  у ній (тобто не поглинати звук усередині звукоізолюючого облицювання, - а, навпроти, максимальним образом "відштовхувати" його: для чого конструктори звукоізоляції у своїх добутках генерують штучним образом явище повного внутрішнього відбиття звуку, використовують у якості "начинки" пустотілих звукоізолюючих панелей вакуум як

середовище, що не проводить звук, і ін.)

Куди ж подінеться відбитий звук? Він перевідбивається від звукоізолюваних поверхонь убік незвукоізолюваних, випробовує на своєму шляху, як правило, багаторазове відбиття, - і в остаточному підсумку, просто поглинається в повітрі й на поверхнях перешкод.

Із цього погляду спроба поміщати особливо гучні вузли в (чи ледве не герметичні) звукоізолюючі кожухи, бокси, капсули, закриті з усіх боків, (і, за задумом їхніх авторів, належні "утримувати" звук усередині таких кожухів, боксів і капсул), виглядає досить абсурдною?! Сутність звукоізоляції - перевідбити звук, "не пропустити" його в одному напрямку, а направити його переважне поширення в напрямку якомусь іншому: безпосереднє ж завдання шумопониження звукоізоляція не вирішує. Вона просто перерозподіляє звукові потоки: "сюди для звуку - не можна; а от туди - можна".

Останнім часом звукоізоляцію стали сполучати зі звукопоглинанням: (за рахунок нанесення додаткового звуковбирного покриття, наприклад, з пористого матеріалу на лицьову поверхню звукоізолюючого пристрою). Як ні парадоксально виглядає з боку така спроба об'єднати два діаметрально протилежних полюси шумозахисних мір: (звукоізоляція + звукопоглинання) у єдине ціле, - вона досить діюча. Це порозумівається так: варто адже не просто ізолювати що-небудь (якийсь "об'єкт, що захищається") від влучення на нього звуку - (тобто відбивати звук від поставленої на його шляху перешкоди); варто враховувати заодно, що первинно відбитий від даної перешкоди звук нікуди не подінеться; він перевідбивається

від інших, далеких перешкод, протилежно встановлених стосовно нашої звукоізоляції, знову й знову; щораз у замкнутому обсязі приміщення пробігає відстань між кожними двома наступними відбиттями: (для чого в акустиці навіть уведений термін "середня довжина вільного пробігу звукових променів"); – і в остаточному підсумку, вимагає поглинання!

З врахуванням того, що будь-яка перешкода на його шляху, (у т.ч. навіть хвалена звукоізоляція з високим коефіцієнтом відбиття  $\rho$ ), має певний коефіцієнт поглинання  $\alpha$ , звук поглинається на поверхнях й у товщі перешкод, і в остаточному підсумку загасає. Отже, поєднуючи несумісні на перший погляд речі (звукоізоляцію й звукопоглинання в одному пристрої), ми просто вирішуємо одночасно два завдання:

- 1) перевідбиття звуку;
- 2) поглинання його при кожному черговому відбитті.

Звукоізоляцію й звукопоглинання в даному контексті не варто розглядати як щось взаємно заперечливе, міркувати про те, «який захід - звукоізоляція або звукопоглинання більше ефективний?» - найвищою мірою некоректно: це - Інь й Ян; це - дві сторони одного й того ж самого (загального процесу зниження шуму в якомусь обсязі); це - дві охоплені єдністю протилежності.

Тому на лицьову сторону звукоізолюючих пристроїв і наносять звичайно (для поліпшення загального загасання звуку) додатковий шар звуковбирного матеріалу.

Таке сполучення вдало апробоване надвеликою кількістю конструкцій пристроїв для зниження шуму.

Ми, до речі, у цьому плані пішли трохи далі - і,

розробивши спосіб звукоізоляції, заснований на поляризації звуку у твердому середовищі багат шарової звукоізолюючої панелі, та здійснення явища повного внутрішнього відбиття звукових променів від шару-поляризатора [102], - розташували шар звуковбирного матеріалу не зовні (на лицьовій поверхні), а усередині, (за цими самими звукоізолюючими шарами, що забезпечують поляризацію та повне внутрішнє відбиття звуку, як від дзеркала). Порозумівається дуже просто: поляризація успішно діє лише при певних кутах падіння звуку; оскільки в реальних умовах варто миритися з надходженням перевідбитих звукових променів, що падають із усіляких напрямків - очевидно, що поляризація звуку не є стовідсотковою панацеєю? Таке акустичне дзеркало буде діяти лише при визначених напрямках падіння звуку; але в реальних умовах (перевідбиття від стелі, стін, підлоги приміщення) ми не в спроможності забезпечити тільки такі самі напрямки? Тоді в дію й вступає вищезгаданий звуковбирний шар, розміщений не перед, а за шарами звукоізоляції, які поляризують звук. Він поглинає звукову енергію, що прийшла з іншого, непередбаченого (орієнтацією такої звукоізолюючої панелі перпендикулярно переважного, основного потоку) напрямку.

Приклади сумісної дії засобів звукопоглинання та звукоізоляції можна було б ще довго продовжувати. Та, мабуть, має сенс зупинитися і казати, що заходи з звукопоглинання та звукоізоляції не можуть бути застосовані окремо; вони доповнюють одне одного, вони обов'язково повинні діяти в комплексі. І тоді, визнаючи неодмінну наявність в приміщенні різноспрямованого



перевідбитого звуку, який вимагає поглинання, який не може бути «зменшений» тільки саме засобами звукоізоляції: (тому що, як показано вище, звукоізоляція не «зменшує» рівні звуку, вона лише впливає на відбиття звукових променів, захищаючи від таких прямих променів найбільш важливі об'єкти, наприклад, робочі місця біля станків, де знаходяться люди, та ін.), звертаємось до засобів звукопоглинання. Вони повинні зменшити розсіяну в просторі звукову енергію, поглинути, вбрати її в себе – і тому обов'язково повинні бути встановлені разом з засобами звукоізоляції в одних й тих же умовах, в одному приміщенні, - в рамках описаної їхньої сумісної дії. Виконується аналіз ефективності поглинання пружних хвиль у залежності від розмірів пір, що дозволяє вдосконалити конструкцію таких звуковбирних прокладок, виготовлених із пористого матеріалу.

Ключове положення наукової гіпотези автора: вакуум - це властивість сосуду, в якому поміщений газ; він визначається співвідношенням між довжиною вільного пробігу молекул та відстанню між стінками того сосуду, а зовсім не тиском. З врахуванням того співвідношення, окрему пору в пористому матеріалі, заповнену повітрям (при атмосферному тиску у нормальних умовах) слід розглядати як мікроскопічну вакуумовану порожнину.

Це істотно змінює погляд на сутність звукопоглинання, оскільки попередні дослідники, знаючи, що пори в пористому матеріалі заповнені повітрям (при атмосферному тиску), (але не вважаючи їх за вакуумні судини), без всякого успіху намагалися врахувати ефект проходження звуку крізь ті пори. Ми ж приймаємо їх за вакуумовані судини, що звук не проводять; а

звукопоглинальні властивості пористих матеріалів враховуємо за рахунок поглинання звуку в твердій товщі самого матеріалу. Врахування мікроструктури пористих матеріалів при поясненні їхніх звуковбирних властивостей описано в роботах [121, 122].

#### **4.10. Вплив мікроструктури пористих матеріалів на їхні звуковбирні властивості**

Проблема удосконалення існуючих засобів боротьби із шумом у даний час є досить актуальною. Одним з напрямків її розв'язання є створення звуковбирних облицювань з пористих матеріалів. Такими матеріалами, згідно з сучасною конструкторською практикою, облицюються лицьові поверхні багатьох звукоізолюючих конструктивних елементів [132], що забезпечує підвищення ефективності дії таких шумозахисних пристроїв. Так, лицьова поверхня запатентованих нами звукоізолюючих елементів згідно за формулою винаходу (див. наступну частину) може мати таке покриття з пористих матеріалів. При тому додатковий шар з іншого матеріалу забезпечує умови для поляризації звуку, і утворює той самий «сандвіч», о якому говорилося в попередньому підрозділі. Таким чином, розмірковуючи про поляризацію звуку, і розробляючи багатошарові шумозахисні прилади, не можна оставити в боці верхнє покриття таких пристроїв, що грає додаткову роль в процесі зменшення шуму та виконується з пористого матеріалу.

При цьому дотепер відсутнє обґрунтування взаємозв'язку між мікроструктурою цих матеріалів і їх акустичними характеристиками, що утрудняє їхній підбір і використання. Перша спроба дати таке обґрунтування була

розпочата в роботі [144]. В [121, 145] приводиться докладний і розширений опис механізму дії пористих звукопоглиначів відповідно до наших досліджень.

Не вдуваючись до детального переказу [121, 145], скажемо, що в цій роботі вперше висунута оригінальна ідея розглянути пористу мікроструктуру таких звукопоглиначів як сукупність з'єднаних між собою вакуумованих судин. (Перешкодою на шляху звуку може бути середовище, позбавлене пружності, тобто вакуум. Ця ідея реалізована в цілому ряді відомих звукоізолюючих пристроїв (звукоізолюючих панелей), що містять порожнину з вакуумом усередині твердого корпусу (наприклад, [132])). В роботі [121] показано, що, заповнені повітрям пори в просторі звукопоглиначів можна розглядати як мікроскопічні вакуумовані судини. Так, в роботі [99] наводиться формула для розрахунку довжини вільного пробігу молекул  $l$ : (основна характеристика вакууму, від якої також залежить пропускання звуку) залежно від розміру  $d$ , що являє собою характерний розмір вакуумованої судини. Вищевказане теоретичне положення цілком підтверджується роботою [146], де зазначено, що якщо газ настільки розріджений, що виконується умова  $d \leq l$ , то “молекулы непосредственно переносят импульс от одной пластинки к другой, ни с чем не сталкиваясь по дороге, и переносимый импульс пропорционален числу молекул, способных его переносить, и обращается в нуль при полном вакууме”. Як уже відзначалося вище, ці принципи використовують при конструюванні звукоізолюючих пристроїв з вакуумом.

Однак у тій же роботі [146] далі зазначено, що “состояние заключенного в сосуд газа (разреженный или

плотный) – свойство скорее сосуда, чем газа. При нормальной атмосферной плотности свободный пробег  $l \sim 2 \cdot 10^{-5}$  см. Следовательно, когда воздух обтекает самолет, он должен считаться плотным. Но если он течет в тонком капилляре радиуса  $< 2 \cdot 10^{-5}$  см или в очень мелких порах специального фильтрующего вещества, тот же воздух ведет себя как разреженный”. Аналізуючи це висловлення, можна прийти до висновку про те, що дрібні пори і капіляри мають  $\tau = 0$ , тобто наділені звукоізолюючою здатністю  $R = +\infty$  дБ. Це обумовлено особливостями розріджених газів на відміну від щільних.

У той же час відомі так звані пористі і штучні (виконані з пористих звуковбирних матеріалів) звукопоглиначі, причому поглинання звуку такими матеріалами в роботі [147] порозумівається тим, що воно “происходит в результате перехода звуковой энергии в тепло вследствие преодоления внутреннего трения в порах”.

Високі звукоізолюючі (звукопоглинання забезпечує і звукоізоляцію) властивості звуковбирних матеріалів із дрібними порами порозуміваються автором цієї роботи безпосередньо, як результат наявності в них вакуумованих порожнин, тобто пір, наповнених повітрям при тиску рівному атмосферному, - котрі, проте, через свої малі розміри поводяться як мікроскопічні вакуумовані звукоізолюючі пристрої за умови  $l \geq d$ , де  $d$  - діаметр пори.

Вірогідно, звуковбирні властивості пористих матеріалів пояснюються тим, що звукова енергія, потрапляючи в них, незначно відбивається від границі розподілу середовищ "повітря - пористий матеріал" і проходить усередину, випробуючи при розповсюдженні у

твердому матеріалі оболонки пір, (тобто – волокнам матеріалу), звукопоглинання за зазначеними вище причинами. Усередині самих пір переноситися вона не може, отже, вона відбивається від їхніх стінок, причому роздіблюється в різноманітних напрямках. Ці відбиття багаторазові, тому що кількість пір дуже велика. Таким чином, значно збільшується відстань, прохідна хвилею усередині шару пористого і волокнистого матеріалу. Однак на відміну від відомих панелей з вакуумованими порожнинами (великого порівняно з довжиною звукової хвилі розміру), що забезпечують звукоізоляцію, пористі й волокнисті матеріали мають макроскопічні (свідомо порівнянні з довжиною звукової хвилі чутного діапазону) розміри, їхній "екран" мікропор не є суцільним і, зрештою, звукова хвиля "обтікає" їх завдяки дифракції і виходить назовні, значно ослаблена.

Вищевикладені теоретичні передумови послужили основою розробки конкретних протишумових пристроїв, про яких розповідається в наступному розділі.

#### **Висновки до розділу 4**

В даному розділі викладено теоретичні засади запропонованих рішень в галузі конструювання засобів звукоізоляції та звукопоглинання, тобто наукові основи інженерних рішень для ослаблення інтенсивності звуку, розроблені особисто автором. А саме – надається ідея глобальної теорії, що пояснює процеси зменшення шуму як результат перетворення хвилі одного типу у хвилю іншого типу при переході границі розподілу середовищ (за рахунок видозміни векторів коливальної швидкості й зсуву звукової хвилі при перетинанні границь розподілу різних середовищ), що, на нашу думку, також може претендувати

на рівень наукового відкриття [152]?

Ідея сформульована в публікаціях [116, 118], розвинена в багатьох інших [102, 103, 123, 126, 127, 120, 121, 122, 151], а 25.05.94 автором був зафіксований факт подання документу «Зависимость коэффициентов звукопоглощения и отражения звука от характеристик среды распространения падающей и пропущенной звуковой волны», що офіційно зареєстрований як «Заявка на открытие № ОТ ОВ 56» [152]. Формула пропонованого наукового відкриття в цій монографії викладена декілька іншим чином, ніж в [152] (хоча адекватна первісному формулюванню за суттю). Це пояснюється значним уточненням нашої теорії за 19 років, що пройшли з моменту подавання первісної заявки (наприклад, авторські наукові публікації [102, 103, 123, 126, 127, 120, 121, 122, 116, 118]). Корекція стосується акуратності, точності, лаконізму формулювань, та ніяким чином не змінює вихідну первісну суть. Якщо б заявка [152] подавалася б в 2013 р., (а не в 1994), викладені в ній матеріали ми скоригували би таким чином:

Формула передбаченого наукового відкриття:

«Виявлена невідома раніше залежність коефіцієнтів поглинання та відбиття звуку від характеристик середовища розповсюдження звукової хвилі, що падає на перешкоду та пропускається крізь неї: ослаблення інтенсивності звукової енергії при зіткненні звукової хвилі з перешкодою відбувається за рахунок видозміни векторів коливальної швидкості й зсуву звукової хвилі при перетинанні границь розподілу різних середовищ, тобто за рахунок перетворення поздовжньої звукової хвилі в поперечну, наприклад, при переході границі розподілу

середовищ: "повітря - тверде тіло" (зниження шуму при падінні звукової хвилі з повітря на звукоізолюючий екран); за рахунок зміни напрямку векторів коливальної швидкості й зсуву (перетворення поперечної хвилі одного типу в поперечну ж хвилю іншого типу) при переході границі розподілу двох твердих тіл з різними фізико-хімічними характеристиками (зниження шуму усередині багатошарової звукоізолюючої панелі типу "сандвіч") і ін.»



КОМИТЕТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ПО ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ (РОСПАТЕНТ)  
**НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ГОСУДАРСТВЕННОЙ  
ПАТЕНТНОЙ ЭКСПЕРТИЗЫ (НИИПЭ)**

121858 Москва, Бережковская наб., 30, корп. 1

Телефон 246-80-15 Телекс 114818 ПДЧ Факс 243-33-37

На № \_\_\_\_\_  
(21) Наим № \_\_\_\_\_

(98) В.Э.Абрамцову

ОТ ОБ 56  
18/12-224 6.06.94

На Ваше заявление о выдаче диплома на открытие под названием "Зависимость коэффициентов звукопоглощения и отражения звука от характеристик среды распространения падающей и пропущенной звуковой волны" (заявка МОТ ОБ 56 от 25.05.94) сообщаем, что представленные Вами материалы ВНИИПЭ Роспатента получены.

В связи с тем, что в функции Роспатента не входит рассмотрение заявок на открытия, материалы заявки № ОТ ОБ 56 приняты ВНИИПЭ на хранение до решения вопроса о порядке экспертизы заявок на открытия.

О принятом в отношении заявок на открытие решении Вы будете извещены дополнительно.

Заведующий Отделом  
методологического и  
юридического обеспечения  
экспертизы

В.П.Зель

*Рис. 4.11 – Сканований документ [152] від 25.05.94 р.*

Первісна формула в [152] говорить практично теж саме – але декілька іншим чином.

## **5. ІНЖЕНЕРНІ Й КОНСТРУКТИВНІ РІШЕННЯ ПРИ СТВОРЕННЯ ШУМОЗАХИСНИХ ЗАСОБІВ**

### **5.1. Багатошарова звуковбирна панель, що обгороджує**

У раніше опублікованої автором роботи [144] розпочата спроба описати механізм дії пористих звукопоглиначів. Було відзначено [121], що при проходженні звукової хвилі через матеріал із крупними порами відбувається її багаторазове переломлення на границі розподілу середовищ “повітря – пористий матеріал”, що, у свою чергу, збільшує його звукоізолюючі властивості в порівнянні з матеріалом, позбавленим пір. Також указувалося, що в матеріалах із невеликими порами ці пори утворюють мікроскопічні вакуумовані звукоізолюючі пристрої, і звукова енергія через пори не переноситься, що значно зменшує звуковбирні властивості матеріалу з невеликими порами, але збільшує його звукоізолюючі властивості. Усі вищевикладені теоретичні передумови були використані при створенні конкретного протишумового пристрою.

Багатошарова звуковбирна панель, що містить мікроскопічні звукоізолюючі пристрої, згідно за дослідженнями попередньої частини та [121, 145] представлена в роботі [122, 151], де докладно описана її конструкція.

Відомі різні види звукопоглиначів у вигляді плит, або формованих елементів із скляних, органічних або мінеральних волокон, і з пінопласту з відкритою пористістю (найчастіше пінополіуретан) [143]. Всі вони мають наскрізну пористість із розмірами пор менш 1 мм.



Усередині пор може поширюватися звук, що загасає через втрати. Всі структурні величини (діаметр пор, діаметр волокна) дуже малі в порівнянні з довжиною хвилі, що дозволяє розглядати ці матеріали як однорідне середовище із внутрішніми втратами.

Передача звукової енергії, тобто енергії пружних хвиль при цьому здійснюється за рахунок зіткнень сусідніх часток при їх коливаннях. Фізичний зміст явища полягає в тому, що звукові хвилі здатні поширюватися практично в будь-якій середовищі, що володіє властивістю пружності, тобто в будь-якому відомому матеріалі. У зв'язку з цим боротьба із шумом на шляху його розповсюдження стає скрутною.

У раніше опублікованих роботах [144, 121, 122] наводиться спроба описати механізм дії пористих звукопоглиначів. В [85] говориться, що при проходженні звукової хвилі через матеріал із крупними порами відбувається її багаторазове переломлення на границі розподілу середовищ “повітря – пористий матеріал”, що, у свою чергу, збільшує його звукоізолюючі властивості в порівнянні з суцільним матеріалом.

Єдиною перешкодою на шляху звуку може бути середовище, позбавлене пружності, тобто вакуум. Згідно [104, с. 67 - 68] вакуум являє собою стан укладеного в судину газу з тиском значно нижче атмосферного, і поведінка його визначається співвідношенням між довжиною вільного пробігу молекул  $l$ , (середньою відстанню, що проходить частка між двома її послідовними зіткненнями з іншими частками), і розміром  $d$ , характерним для даної вакуумної судини чи процесу. Для забезпечення коефіцієнта пропущення звуку  $\tau = 0$

необхідна наявність середнього вакууму, коли виконується умова  $l = d$  (тиск порядку  $10^2 > P > 10^{-1}$  Па) по досягненні якого припиняється пряма передача енергії звукових коливань від однієї частки пружного середовища до іншої між стінками судини. У роботі [99] наводиться формула для розрахунку довжини вільного пробігу молекул  $l$ .

В роботі [146] зазначено, якщо газ настільки розріджений, що виконується умова  $d \leq l$ , то “молекулы непосредственно переносят импульс от одной пластинки к другой, ни с чем не сталкиваясь по дороге, и переносимый импульс пропорционален числу молекул, способных его переносить, и обращается в нуль при полном вакууме”. Надалі в [146] зазначено, що “...состояние заключенного в сосуд газа (разреженный или плотный) – свойство скорее сосуда, чем газа. При нормальной атмосферной плотности свободный пробег  $l \sim 2 \cdot 10^{-5}$  см. Следовательно, когда воздух обтекает самолет, он должен считаться плотным. Но если он течет в тонком капилляре радиуса  $< 2 \cdot 10^{-5}$  см или в очень мелких порах специального фильтрующего вещества, тот же воздух ведет себя как разреженный...”. Можна прийти до висновку про те, що дрібні пори і капіляри мають  $\tau = 0$ , тобто наділені звукоізолюючою здатністю  $R = +\infty$  дБ. Це обумовлено особливостями розріджених газів на відміну від щільних.

У той же час відомі так називані пористі і штучні (виконані з пористих звуковбирних матеріалів) звукопоглиначі, причому поглинання звуку такими матеріалами в роботі [147] порозумівається тим, що воно “происходит в результате перехода звуковой энергии в тепло вследствие преодоления внутреннего трения в порах”.

Високі звукоізолюючі (звукопоглинання забезпечує і звукоізоляцію) властивості звуковбирних матеріалів із дрібними порами порозуміваються авторами дійсної роботи як результат наявності в них вакуумних порожнин, тобто пір, наповнених повітрям при тиску рівному атмосферному, - котрі, проте, через свої малі розміри поводяться як мікроскопічні вакуумні звукоізолюючі пристрої за умови  $l \geq d$ , де  $d$  - діаметр пори. Вірогідно, звуковбирні властивості пористих матеріалів пояснюються тим, що звукова енергія, потрапляючи в них, незначно відбивається від границі розподілу середовищ "повітря - пористий матеріал" і проходить усередину, випробуючи при розповсюдженні по твердому матеріалі оболонки пір (волокнам матеріалу) звукопоглинання за зазначеними вище причинами. Усередині самих пір переноситися вона не може, отже, вона відбивається від їхніх стінок, причому роздрібнюється в різноманітних напрямках. Ці відбиття багаторазові, тому що кількість пір дуже велика. Таким чином, значно збільшується відстань, прохідне хвилею усередині шару пористого і волокнистого матеріалу. Однак на відміну від відомих панелей з вакуумними порожнинами, що забезпечують звукоізоляцію, що мають макроскопічні (свідомо порівнянні з довжиною звукової хвилі чутного діапазону) розміри, "екран" мікропор не є суцільним і, зрештою, звукова хвиля "обтікає" їх завдяки дифракції і виходить назовні, значно ослаблена.

Це пояснюється рис. 12 а, б, в, де схематично зображене проходження звукової хвилі через шари різних матеріалів, причому шлях проходження звукової хвилі умовно представлений у виді променів, що показують напрямки її поширення. Форми пір виконані в довільному

масштабі лінійних розмірів.

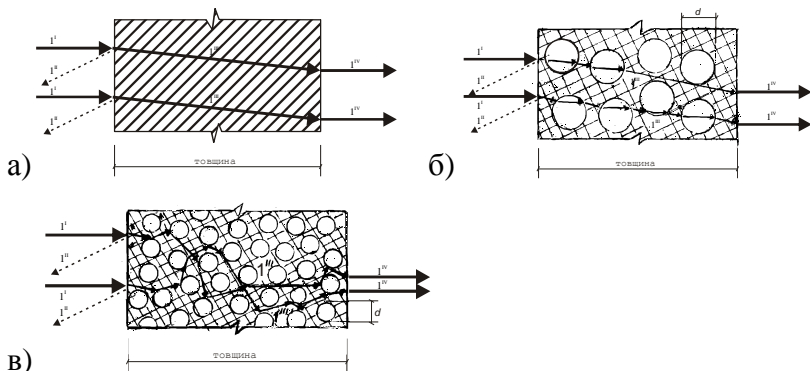


Рис.5.1 – Проходження звукової хвилі через матеріал:  
 а - суцільний; б - матеріал із великими порами за умови, що  $l < d$ ;  
 матеріал із дрібними порами за умови, що  $l > d$ :  $I^I$  – промінь, що падає;  $I^{II}$  - відбитий промінь;  $I^{III}$  - переломлений промінь усередині шару звукопоглинач;  $I^{IV}$  - промінь, що вийшов із шару звукопоглинач

Прямолінійність поширення падаючого променя 1 при вході усередину шару в будь-якому випадку порушується через характерні хвильові явища (в основному переломлення) усередині шару матеріалу - промінь  $I^{III}$ . При проходженні звукової хвилі через матеріал її енергія частково відбивається - промінь  $I^{II}$ , частково пропускається усередину матеріалу - промінь  $I^{III}$ , де випробує поглинання, причому величина коефіцієнта поглинання  $\alpha$  залежить не тільки від фізико-хімічних властивостей матеріалу, але і від довжини шляху, що проходить звукова хвиля усередині шару речовини. Незавжди бачити, що при рівній товщині шару шлях проходження звукової хвилі через нього буде більше для матеріалу з великими порами, чим для матеріалу, узагалі позбавленого пір, наприклад, металу (рис. 1а). Це порозумівається тим, що звукова енергія здатна

переноситься через великі ( $l < d$ ) пори, але при такому переносі звукова хвиля багаторазово переломлюється в кожній порі на границі розподілу середовищ. Отже, матеріал із великими порами володіє кращими звукоізолюючими властивостями, чим узагалі позбавлений пір, що є загальновідомим фактом.

У випадку, якщо пори в матеріалі настільки дрібні, що дотримується умова  $l > d$  (рис. 1б), відповідно до приведеного вище міркуванням, вони поведуться як мікроскопічні вакуумні звукоізолюючі пристрої, тобто звукова енергія власне через них не переноситься. На відміну від макроскопічних вакуумних звукоізолюючих пристроїв (тобто звукоізолюючих панелей і т.п. конструкцій з вакуумною порожниною) пори не утворять суцільну непроникну перешкоду на шляху поширення звуку усередині утримуючого їх шару речовини, і звукові хвилі обгинають їх унаслідок дифракції. Однак при цьому значно збільшується шлях, що проходить звукова хвиля в шарі речовини. Крім того, звукова хвиля відбивається від стінок таких пір, тому що не може в них проникнути. У результаті коефіцієнт  $\alpha$  у матеріалів із дрібними порами може виявитися нижче, ніж у матеріалів з великими порами, але зате в них набагато яскравіше виражені звукоізолюючі властивості:  $\tau \rightarrow \min$ ,  $\rho \rightarrow \max$ . Узагалі коефіцієнт  $\alpha$  таких матеріалів залежить від пружності каркаса, де знаходяться пори.

Багатошарова звуковбирна панель, що містить мікроскопічні звукоізолюючі пристрої, згідно за дослідженнями попередньої глави та [121] представлена на рис. 5.2. Вона складається з декількох шарів пористого звуковбирного матеріалу з різними характеристиками,

позначених позиціями I, II, III, IV. У кожному з таких шарів маються пори, позначені індексом 1: пори в кожному із шарів позначені як  $I_1, II_1, III_1, IV_1$ ; вони (пори) заповнені атмосферним повітрям. Також у кожному такому шарі мається пружний каркас із твердої речовини (наприклад, волокна) 2, позначений у кожному із шарів як  $I_2, II_2, III_2, IV_2$ .

Хімічний склад пружного каркаса 2 у всіх шарах може бути однаковий (тобто використана та ж сама речовина, але різні шари між собою різні по розмірах пір), тобто діаметри пір  $d_I \neq d_{II} \neq d_{III} \neq d_{IV}$ . Відповідно шари розрізняються між собою такою характеристикою, як пористість  $h$  - відношення обсягу пір  $V_{\text{пор}}, \text{м}^3$  до загального обсягу  $V_{\text{заг}}, \text{м}^3$ : визначається за формулою:

$$h = 1 - V_{\text{пор}} / V_{\text{заг}}, \quad (5.1)$$

Інша характеристика пористого матеріалу: масивність  $\mu$  - відношення обсягу волокнистої речовини до загального обсягу:

$$\mu = 1 - h \quad (5.2)$$

У зв'язку з цим шари розрізняються між собою ще однією важливою структурною характеристикою (взаємозалежною з характеристиками  $h$  і  $\mu$ ): питомим опором продуванню потоком  $\Xi$ . При цьому характерний розмір: діаметр пір  $d_I$  у лицьовому шарі 1 найбільший і перевищує довжину вільного пробігу молекул:  $d_I > l$ . Наступний 2-й шар характеризується зменшенням діаметра пір  $d_{II}$  у порівнянні з попереднім шаром:  $d_{II} < d_I$ . У кожному наступному шарі діаметр пір  $d$  менше, ніж у попередньому  $d_{I-1}$ .

Аеродинаміка такого компонування шарів (у кожному наступному шарі діаметр пір менше, ніж у попередньому,

аж до їхнього зменшення до розміру  $d \leq 10^{-7}$ ) передбачає східчає збільшення питомого опору продуванню потоком  $\Xi$  по загальній товщині багатошарової звуковбирної панелі.

Кількість шарів може бути більшим, ніж 4. Збільшення числа шарів тільки збільшує ефективність звуковбирної панелі в плані боротьби із шумом.

Принцип роботи пристрою полягає в наступному. Звукова хвиля, напрямком поширення хвильового фронту якої представлене променями 3, входить ззовні (з повітряного середовища) у лицьовий шар 1, при цьому частина звукової енергії відбивається на границі розподілу середовищ “повітря – шар 1”.

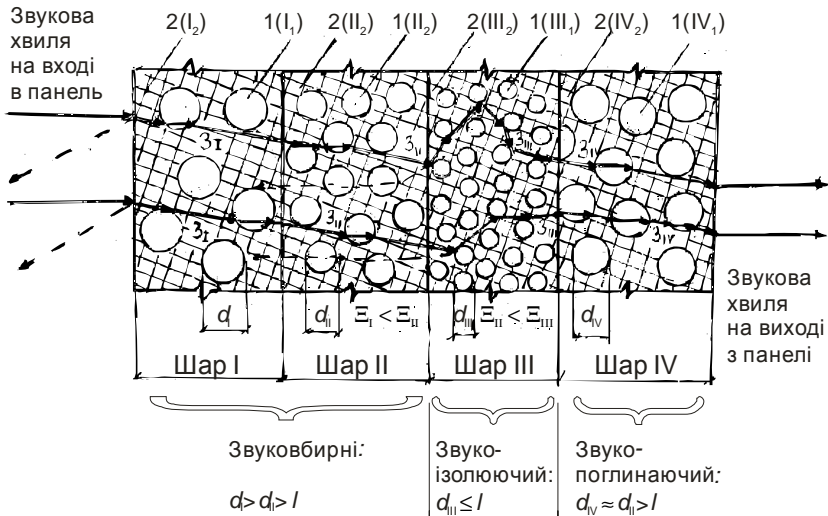


Рис 5.2. – Звуковбирна панель з мікроскопічними вакуумними звукоізолюючими пристроями:

*I, II, III, IV - шари пористого матеріалу; 1 (1<sub>I</sub>, 1<sub>II</sub>, 1<sub>III</sub>, 1<sub>IV</sub>) – пори, заповнені атмосферним повітрям у кожному шарі; 2 (2<sub>I</sub>, 2<sub>II</sub>, 2<sub>III</sub>, 2<sub>IV</sub>) - пружний каркас у кожному шарі; 3 (3<sub>I</sub>, 3<sub>II</sub>, 3<sub>III</sub>, 3<sub>IV</sub>) - напрямок поширення звукової хвилі*

Частина, що залишилася, позначена в шарі 1, що примикає до границі розподілу, як промінь  $3_I$ , проходить цей шар 1. При цьому передвічно плоский її хвильовий фронт трансформується через наявність пір  $1_I$ . Звукова енергія з причин, зазначених вище, поширюється як усередині пір 1, так і поза цими порами по пружному каркасі 2, випробуючи поглинання. Те ж саме відбувається й у наступному за ним шарі 2. Наявність двох і більш шарів, що розрізняються між собою розмірами пір, дозволяє зменшити коефіцієнт відбиття  $\rho$  лицьової поверхні. Для шару 1 на границі розподілу “повітря – шар 1”  $\rho$  має основне значення, тому що є характеристикою, по якій в остаточному підсумку визначається ефективність пристрою. Таким чином, у шарі 1  $\tau \rightarrow \min$ , однак він досить великий; для наступних шарів за рахунок зменшення діаметра пір  $d$  (відповідно і збільшення шляху, що пройшла звукова хвиля усередині зазначених шарів) коефіцієнт пропущення  $\tau$  звука зменшується и  $\tau_{II} < \tau_I$ ; коефіцієнт відбиття звуку на границях розподілу шарів у кожній парі шарів збільшується:  $\rho_{II} > \rho_I$ . Унаслідок  $\alpha$  поступово наростає по товщині панелі. Однак у традиційних конструкціях пристроїв аналогічного призначення звук, пройшовши ці шари із крупними порами, виходить назовні (наскрізь) зі зворотної сторони звукопоглиначу. Істотною відмінністю пропонованої конструкції є наявність “звукоізолюючих шарів”. Завдяки наявності мікропор, де підтримується умова  $l > d$ , коефіцієнт пропущення  $\tau_{III}$  такого шару значно менше коефіцієнтів пропущення попередніх шарів, що веде до того, що значна частина звукової енергії, позначена на рис. 5.2. як промінь  $3_{III}$ , відбивається від нього назад у попередні



шари 2 і 1, що завдяки цьому повторно задіються для поглинання звуку. За зазначеними вище причинами частина звукової енергії все-таки проходить шар 3, тому за ним передбачений знову звуковбирний шар 4, служить для забезпечення додаткового поглинання енергії (луч  $3_{IV}$ ) на виході зі зворотної сторони звуковбирної панелі.

Власне кажучи, багатошарові звуковбирні панелі добре відомі. Однак у докладних описах механізму їхньої дії, приведеним, наприклад, у [143], дослівно зазначено: “все они обладают сквозной пористостью с размерами менее 1 мм. Внутри пор может распространяться звук, затухающий из-за потерь”, (за нашими даними, це вірно лише коли дотримується умова  $d > 10^{-7}$  м, як це впливає з вищевикладеного), а також “все структурные величины (диаметр пор, диаметр волокна) очень малы по сравнению с длиной волны, что позволяет рассматривать эти материалы как однородную среду с внутренними потерями”, через що підбор сполучення структурних характеристик кожного шару ведеться, по суті, без обліку їхньої мікроструктури (що, природно, не завжди позитивно позначається на їхніх властивостях у плані звукопоглинання). Хоча в роботі [143] емпірично виявлено, що “переход от свободного поля к акустически жесткой стене должен происходить за счет ступенчатого увеличения удельного сопротивления продуванию при переходе от слоя к слою”. Ця цитата в сукупності з іншими даними, приведеними в [143], свідчить про правомірність теоретичних міркувань нашої роботи. Зазначені дані (робота [143]) виходять з експериментальних спостережень і теорій однорідного і квазіоднорідного поглиначів і на цьому емпіричному рівні вважається [143], що “попытки

лучше участь мікроструктуру матеріала... не оканчивались ничем”. У той же час у нашій роботі [85] ця проблема зважується саме як проблема обліку мікроструктури матеріалу.

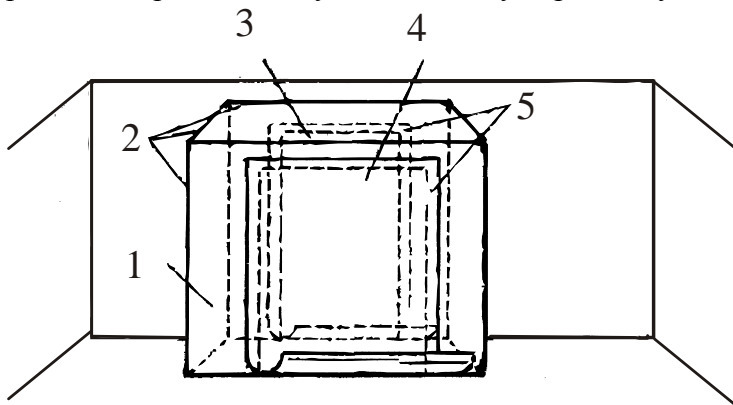
Цікавою особливістю вакуумних звукоізолюючих пристроїв є відсутність залежності між звукоізолюючою здатністю і зовнішнім акустичним впливом (інтенсивністю звуку, що попадає на такий пристрій, його частотою й іншими акустичними параметрами). Однак має місце наявність залежності між звукоізолюючою здатністю і метеорологічними елементами (параметрами мікроклімату) навколишнього середовища, зокрема її температурою й атмосферним тиском (вплив цих параметрів впливає з формули для розрахунку довжини вільного пробігу молекул, приведеної вище). А поглинання звуку пористими матеріалами було пояснено нами як наслідок звукоізолюючих властивостей їхніх пір, що представляють собою вакуумні порожнини.

Вищевикладені теоретичні передумови [121, 153] послужили основою створення багат шарових звуковбирних панелей [122, 154]. Зазначені звуковбирні панелі забезпечують зниження рівня звуку на 8 – 10 дБА. Вони можуть бути застосовані самостійно у виді конструкцій, що обгороджують, у приміщеннях, де маються в наявності могутні джерела шуму, такі як виробниче устаткування і т.п., а також у якості додаткового звуковбирного покриття на традиційних звукоізолюючих панелях.

## **5.2. Звукоізолюючий тамбур**

Звукоізолюючий тамбур (рис. 5.3), призначений для якісної звукоізоляції вхідних вузлів ревербераційних камер [64, 155]. У зв'язку з конструюванням спеціальних

приміщень для випробувань акустичних засобів виникає необхідність у шумозахисному тамбурі, що, згідно за нашими розробками [64, 155], являє собою каркас 2 із обшиванням 1, виконаний у формі чохла з листового полімерного матеріалу товщиною 2 - 3 мм із входним і вихідним прорізами, перекритими шумозахисними шторами, розташованими на відстані 1,0 - 1,5 м одна від іншої. Тамбур встановлюють біля дверей у ревербераційну камеру задля запобігання додаткового проникнення шуму в її середину. Тамбур працює в такий спосіб: при пересуванні людини усередині тамбура, при відкритті входного прорізу 3, проріз 4 залишається закритим шумозахисною шторою 5, що являє собою надійна перешкода на шляху проникнення звукової енергії. При наступному пересуванні людина, що виходить з тамбура, відкриває проріз 4, у той час коли входний проріз 3 виявляється вже закритим шторою, що 5 дублює захисну перешкоду.



*Рис. 5.3 – Звукоізолюючий тамбур згідно [64, 155]: 1 – чохол із полімерного матеріалу (обшивання); 2 – каркас; 3 – входний проріз (до ревербераційної камери); 4 – входний проріз (до тамбуру); 5 – шумозахисна штора*

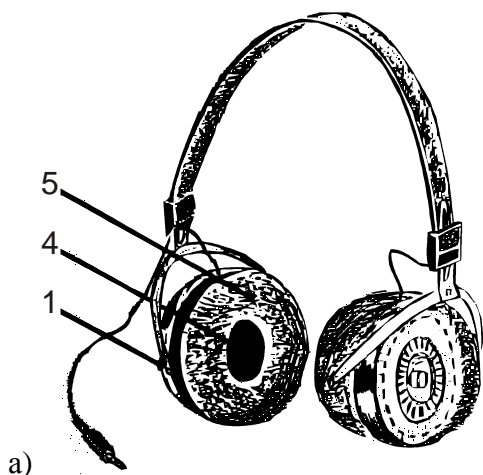
Таким чином, дешевий легкозбірний і розбірний шумозахисний тамбур може бути використаний багаторазово в умовах тимчасово діючих джерел шуму. При цьому його шумозахисна ефективність не уступає стаціонарним спареним дверним блокам.

### **5.3. Головний телефон як засіб індивідуального захисту органів слуху**

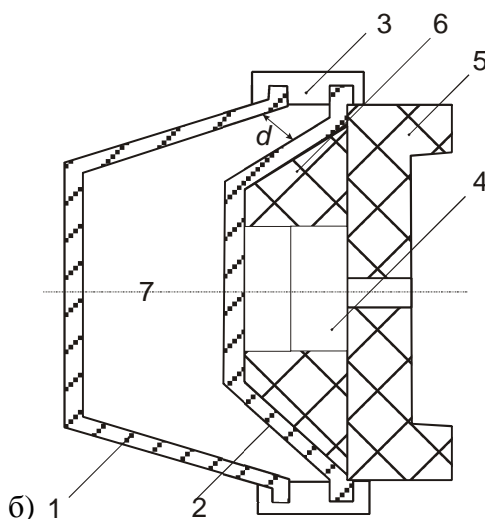
Пропонований прилад [156] відноситься до області конструювання головних телефонів з підвищеними звукоізолюючими властивостями [157]. Прилад може бути застосований в галузі охорони праці як високоефективний засіб індивідуального захисту органів слуху людини, що забезпечує значне зменшення виробничого або транспортного шуму на робочому місці.

Задачею створення [156] є підвищення звукоізоляції від сторонніх звуків, що проникають через подвійний корпус усередину телефону за рахунок чого досягається підвищення якості звучання та ін.

Поставлена задача здійснюється за рахунок того, що головний телефон за [156], що містить два вкладених один в інший корпуси чашеобразної форми, причому внутрішній корпус заповнений звуковбирним матеріалом, має закріплені на ньому випромінювач і амбушюр, корпуси з'єднані між собою по краях пружною прокладкою і розташовані соосно з зазором один щодо іншого, згідно формули винаходу, передбачає, що в просторі між корпусами підтримується середній вакуум з умовою невеликого (на 1 - 2 мм) перевищенням довжини вільного пробігу молекул над найменшою відстанню між корпусами, а пружна прокладка є при цьому герметичною.



а)



б)

Рис. 5.4 – Головний телефон – засіб індивідуального захисту органів слуху [156]: а - зовнішній вигляд (дизайн) стереотелефонів; б – переріз:

1 - зовнішній корпус чашеобразної форми; 2 - внутрішній корпус чашеобразної форми; 3 - пружна прокладка, що герметизує; 4 - випромінювач акустичного сигналу; 5 - амбушюр; 6 - звуковбирний матеріал; 7 - вакуумований простір (з дотриманням умови  $l > d$ )

Така конструкція забезпечує явище повного внутрішнього відбиття звуку, що попадає ззовні телефону на його зовнішній корпус, за рахунок чого забезпечується звукоізолююча здатність  $R = +\infty$  дБ. Крім того, звук усередині головних телефонів також випробує повного внутрішнього відбиття і не виходить зсередини їх назовні, за рахунок чого забезпечується збільшення голосності відтвореної фонограми. Наявність пружної герметичної прокладки винаходу дозволяє здійснити вакуумування внутрішнього простору між корпусами, і підтримувати в ньому вакуум протягом усього періоду експлуатації телефону. Заміна звуковбирного матеріалу прототипу в зазначеному просторі між двома корпусами телефону середнім вакуумом з невеликим (на 1 - 2 мм) перевищенням довжини вільного пробігу молекул над найменшою відстанню (зазором) між корпусами дозволяє різко підвищити звукоізолюючу здатність телефону до гранично можливого значення  $R = +\infty$  дБ, фактично домігшись у ньому здійснення фізичного явища повного внутрішнього відбиття.

На кресленні представлено конструктивне влаштування головного телефону. Телефон конструктивно складається з зовнішнього корпуса 1, чашеобразної форми, і внутрішнього корпуса 2, також чашеобразної форми, вкладених один в іншій і з'єднаних між собою пружною прокладкою, що герметизує 3.

Простір між дном внутрішнього чашеобразного корпуса 2 та закріпленням на ньому випромінювачем 4 і амбушюром 5 з м'якого матеріалу, що формується, заповнено звуковбирним матеріалом 6. Простір між зовнішнім корпусом 1 і внутрішнім корпусом 2,

обмежений по краях пружною прокладкою, що герметизує 3, являє собою вакуумований обсяг 7, де створений і підтримується середній вакуум з умовою невеликого (на 1 - 2 мм) перевищення довжини вільного пробігу молекул над найменшою відстанню між корпусами 1 і 2.

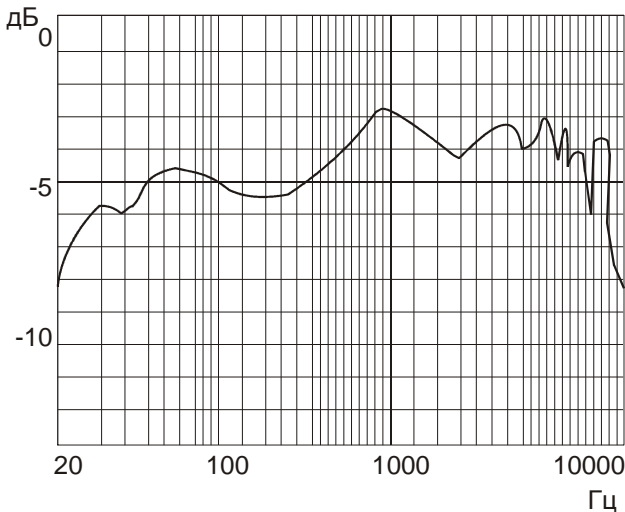
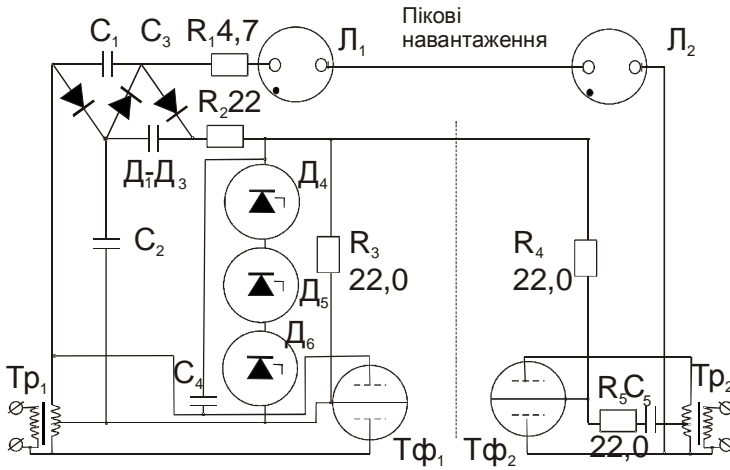


Рис. 5.5 – Схема включення головного телефону (стерео) та частотні характеристики дослідного зразку [156]

Для високоякісного відтворення, - чи, краще сказати, сприйняття відтвореної фонограми сторонні звуки (шуми) не мають ніякого значення, оскільки в пропонованому пристрої відбувається їхнє повне внутрішнє відбиття, і, таким чином, вони "відкидаються" від зовнішнього корпусу 1 назад у навколишнє середовище, відкіля вони і прийшли. За рахунок цього позитивного ефекту різко поліпшується якість звучання. Крім того, аналогічним образом відбувається відбиття і від внутрішнього корпусу 2 звуків відтвореної фонограми, за рахунок чого збільшується їхня голосність; а стороннім слухачам почути ззовні головного телефону Абракітова, надягнутого на слухові аналізатори людини, відтворену в ньому фонограму, не представляється можливим, тобто носіння таких стереофонічних телефонів (у т.ч. і молоддю) не викликає шумового забруднення навколишнього середовища, і не заважає навколишнім, ніяк не створюючи для них небажаних проблем акустичного, психологічного, педагогічного чи етичного характеру.

Корпуси 1 і 2 і пружна прокладка 3, що герметизує, зроблені з урахуванням вимог, пропонованих до пристроїв вакуумної техніки. Таким чином, конструктивне виконання зазначених елементів забезпечує за рахунок підбора необхідної товщини стінок довгострокову механічну міцність, і герметичність, що є достатньою для підтримки в просторі 7 середнього вакууму протягом усього періоду експлуатації головного телефону, причому пружна прокладка, що герметизує, 3 може бути виготовлена з вакуумної гуми, застосовуваної для ущільнення з'єднань у відомих пристроях вакуумної техніки, чи ж іншого матеріалу (лавсан, пластик і т.п.).



Інші ж елементи конструкції адекватні застосовуваним у відомих конструкціях головних телефонів.

*Таблиця 5.1 – Технічні характеристики дослідного зразку*

Назва характеристики	Значення	Одиниця
Номінальний діапазон частот	20-20000	Гц
Номінальний електричний опір	100	Ом
Номінальна вихідна потужність	0,1	мВт
Максимальна вихідна потужність	150	мВт
Коефіцієнт гармонічних викривлень, не більш	1	%

Головний телефон може бути застосований в галузі охорони праці в якості високоефективного засобу індивідуального захисту слуху людини від негативної дії виробничого шуму (у відповідності до вимог [158]). Застосування головних телефонів Абракітова, особливо в стереофонічному варіанті (тобто два телефони закріплені на оголовку) дозволяє забезпечити незрівнянно найвищу якість звучання відтворених фонограм, і здатне внести свою посильну лепту в загальний відсоток зниження акустичного забруднення довкілля.

#### **6.4. Шумоізолюючий кофердам**

Шумоізолюючий кофердам згідно [131] відноситься до засобів корабельної звукоізоляції, застосовуваної, наприклад, на рибальських судах щоб уникнути розполохання риби, що ловиться, шумом працюючих корабельних механізмів (встановлених у машинному відділенні двигунів, устаткування і т.п.), і, що значно важливіше, на бойових кораблях з метою утруднення їх шумопеленгації і знищення акустичними самонавідними мінами і торпедами супротивника.

Відома конструкція корпусу кораблів і судів, при якій вони мають подвійне дно і подвійні борти, наприклад, для цілей підвищення живучості, причому як зовнішнє, так і внутрішнє (друге) дно чи борти є герметичними і водонепроникними, при цьому елементи набору корпусу, розташовані в міждонному просторі - флори, що переходять у шпангоути, і стрингери, також є герметичними і водонепроникними і поділяють зазначений міждонний простір на відсіки (кофердами), що використовуються для збереження рідкого палива, котельні і питної води, мастил [159].

Відомий пристрій для перешкоджання поширення шуму від працюючих механізмів судна чи корабля через його корпус у воду у вигляді шумоізолюючого кофердаму, що представляє собою двохстінну конструкцію з повітряним простором між стінками [119]. Його основним недоліком є низька звукоізолююча здатність, обумовлена наявністю повітряного простору з атмосферним тиском у ньому. Безумовно, у цьому просторі звук послабляється деяким чином за рахунок поглинання і розсіювання на молекулах повітря, однак, він, як і всі інші гази, є середовищем, що проводить звук, що і спричиняє низьку звукоізолюючу здатність такого кофердама.

Прототипом винаходу є шумоізолюючий кофердам судна, що містить герметичний відсік, обмежений непроникними стінками [160].

Даний кофердам має той же недолік, що і відзначені вище пристрою, і, крім того, складний і незручний при користуванні за рахунок можливої відсутності знімної підлоги в машинному відділенні корабля. Для доступу людей усередину, наприклад, для ремонту, можна

передбачити люки і горловини і т.п., а можливість зменшити звукоізолюючу здатність за рахунок розбирання однієї зі стінок кофердаму практично не має ніякого значення, тому що це тільки погіршує і без того низькі акустичні характеристики корабля, оснащеного такими кофердами. Відсутній також взаємозв'язок між живучістю корабля і його знімною підлогою.

Технічним результатом від використання винаходу є забезпечення максимальної звукоізолюючої здатності корпусу судна в сполученні з забезпеченням вимог його живучості і найбільш раціонального використання наявних у наявності конструктивних елементів.

Даний результат досягається за рахунок того, що в шумоізолюючому кофердамі за [131], що містить герметичний відсік, обмежений непроникними стінками, одна зі стінок відсіку сполучена з обшиванням зовнішнього дна чи борта судна, що має подвійне дно чи борти, інша стінка сполучена з обшиванням внутрішнього дна чи борта судна і має люк із кришкою, що герметично закривається, для доступу людей усередину відсіку, і клапан для вакуумування, сполучений із приймачем для забору води суднової аварійної водовідливної системи, інші стінки відсіку сполучені з чи флорами шпангоутами і стрингерами в міждонному чи міжбортному просторі судна, причому усередині відсіку підтримується середній вакуум, тобто дотримується умова  $l \geq d$ , де  $d$  - найменша відстань між зовнішнім і внутрішнім чи дном бортом, м;  $l$  - довжина вільного пробігу молекул, м.

Винахід пояснюється кресленням (рис. 6.6). Шумоізолюючий кофердам містить стінки, сполучені з обшиванням зовнішнього дна чи борта 1, флорами

(поперечними донними балками) 2, чи шпангоутами 3, а також зі стрингерами (подовжніми балками) 4 з обшиванням внутрішнього дна чи борта 5, вакуумований міждонний простір 6, на обшиванні 5 розміщений люк для доступу людей усередину кофердама 7, що закривається герметично кришкою 8, і клапан для вакуумування, сполучений із приймачем для забору води суднової аварійної водовідливної системи 9.

Пристрій [161, 162] працює в такий спосіб.

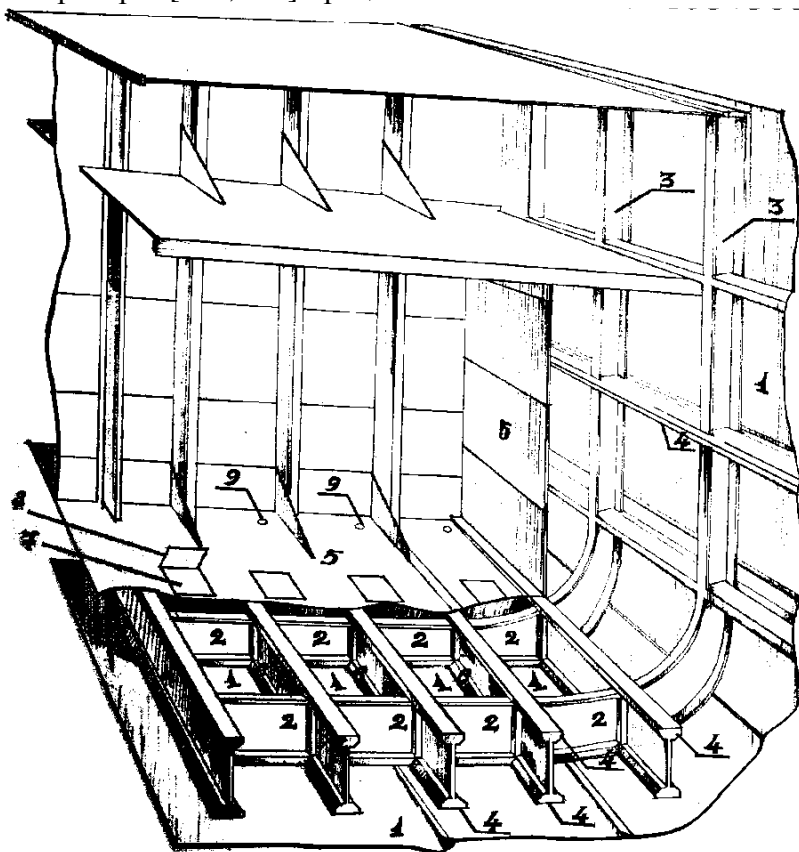


Рис. 5.6 – Шумоізолюючий кофердам згідно [131, 161]

При роботі ДШ усередині судна (двигуна і т.п.) звукові хвилі поширюються від нього в товщі внутрішнього дна чи борта 5. Однак, ввійшовши в міждонний простір 6, вони загасають через відсутність в ньому часток пружного середовища, здатних проводити звук. У такий спосіб запобігають передачі шуму від обшивання зовнішнього дна чи борта 1 у воду.

Винахід може бути застосований практично на будь-якому кораблі чи судні, постаченому подвійним дном, корпус якого має необхідний запас міцності.

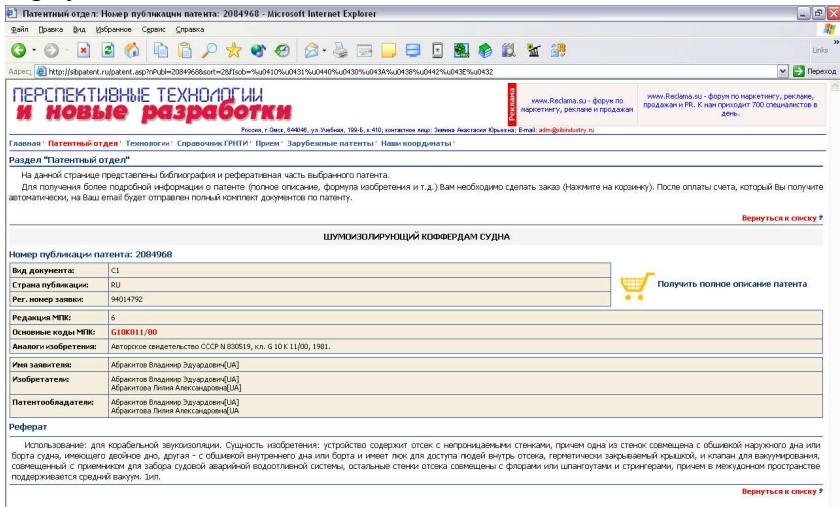


Рис. 5.7 – Офіційна публікація в Інтернет патентного документу [131] за веб-адресою [163]

### 5.5. Пристрій аускультативної діагностики

Пристрій аускультативної діагностики згідно [164, 165] відноситься до медичної техніки, а саме до аускультативних діагностичних пристроїв - фонендоскопів.

Звернемось до медичної техніки, а саме до конструкцій аускультативних діагностичних пристроїв – фонендоско-

пів. Відомий стереофонендоскоп, що містить голівки з мембранами, звукопроводами і рознімним з'єднанням у вигляді двох тримачів з фіксаторами на кінцях і сполучній ланці, причому фіксатори виконані сферичної форми з пластмаси, а сполучна ланка у вигляді еластичної трубки [166]. Недоліком зазначеного пристрою є істотне перекручування АЧХ звукового сигналу, переданого через звукопровід: його ослаблення, наявність перешкод і зовнішніх шумів і т.п., обумовлене низькими звукоізолюючими якостями звукопроводів, унаслідок чого утрудняється прослуховування (здійснення діагностики), виникає небезпека неправильної (помилкової) діагностики лікарем захворювання пацієнта і т.д. Потребується зменшити перекручування АЧХ звукового сигналу за рахунок підвищення звукоізолюючої здатності звукопровідних елементів стереофонендоскопу, у результаті чого усунути ослаблення звукового сигналу, переданого через звукопровідні елементи і запобігти впливу зовнішніх шумів на нього.

Завданням винаходу є зменшення перекручувань АЧХ звукового сигналу за рахунок підвищення звукоізолюючої здатності звукопровідних елементів стереофонендоскопу, у результаті чого усувається ослаблення звукового сигналу, переданого через звукопровідні елементи і запобігається вплив зовнішніх шумів і перешкод на нього.

Поставлене завдання досягається за рахунок того, що стереофонендоскоп, що містить голівки з мембранами, звукопроводами і рознімними з'єднаннями у вигляді двох тримачів з фіксаторами на кінцях і сполучній ланці, причому фіксатори виконані сферичної форми з пластмаси, а сполучна ланка у вигляді еластичної трубки, відповідно до формули винаходу за [164, 165], передбачає,

що кожна голівка виконана у вигляді двох чашеобразних корпусів, вставлених один в іншій з утворенням порожнини між ними, заповненої газом у стані середнього вакууму, кожен звукопровід виконаний у вигляді двох вставлених одна в іншу трубок з утворенням порожнини між ними, заповненої газом у стані середнього вакууму.

Також поставлене завдання досягається за рахунок того, що зовнішній чашеобразний корпус кожної голівки з'єднаний із зовнішньою трубкою відповідного звукопроводу, внутрішній чашеобразний корпус кожної голівки з'єднаний із внутрішньою трубкою відповідного звукопроводу, порожнини між зовнішнім і внутрішнім корпусами голівки з'єднані з порожнинами між зовнішньою і внутрішньою трубками звукопроводу.

Виконання звукопровідних елементів стереофонендоскопу - голівки і звукопроводу подвійними, що складаються з зовнішнього і внутрішнього чашеобразних корпусів голівки, і зовнішньої і внутрішньої трубок звукопроводу з утворенням порожнин між ними, забезпечує можливість заповнення зазначених порожнин газом у стані середнього вакууму і неминуче обумовлено чисто конструктивними розуміннями.

Наявність газу в стані середнього вакууму в зазначених порожнинах забезпечує значне підвищення звукоізолюючої здатності зазначених звукопровідних елементів стереофонендоскопу. Цей газ у стані середнього вакууму (наприклад, звичайне розріджене повітря) є звукоізолюючим шаром, що розділяє внутрішній простір звукопровідного елемента (голівки і звукопроводу), у якому передається корисний звуковий сигнал, і зовнішній атмосферний простір, що перешкоджає втратам

(ослабленню) корисного сигналу за рахунок поширення звуку в зовнішній атмосферний простір, і, навпаки, що перешкоджає проникненню зовнішніх шумів і перешкод у внутрішній простір звукопровідного елемента. У такий спосіб усувається переключування АЧХ переданого корисного звукового сигналу.

Сутність винаходу полягає в наступному.

Звукові хвилі являють собою пружні хвилі, тобто передача енергії в них здійснюється за рахунок коливального руху часток цього пружного середовища. Зменшення щільності цього пружного середовища викликає і зменшення переданої пружними хвилями енергії, у т.ч. і звуковий. (Згідно [99, с. 249, 253], інтенсивність звукових хвиль пропорційна щільності середовища їхнього поширення). Таким чином, газ у стані вакууму володіє високими звукоізолюючими здібностями (у всякому разі, більш високими, аніж газ при нормальних умовах). Вибір діапазону тиску саме середнього вакууму обумовлений наступними розуміннями. Згідно [104, с.68-69], середній вакуум характеризується рівністю між середньою довжиною вільного пробігу молекул, тобто відстанню, прохідним молекулою між двома послідовними зіткненнями, за рахунок яких, власне і передається звукова енергія: коливальний рух часток пружного середовища (і характерним для судини чи процесу розміром, тобто розміром між стінками вакуумованої судини). Таким чином, одержавши кінетичну (звукову) енергію, молекула газу в стані середнього вакууму на всьому шляху від однієї стінки судини до іншої не зустрічає іншу молекулу, який вона могла б передати цю кінетичну (звукову) енергію, і передача звуку між стінками судини цілком припиняється.



Це підтверджується роботою [146 с. 84]: за умови  $l \geq d$  імпульс пропорційний числу молекул, здатних його переносити і звертається в нуль при повному вакуумі. Якщо  $d$  - найменша відстань між стінками внутрішньої порожнини, при цієї умові частка, що переносить звукову енергію на всьому шляху від однієї стінки порожнини до інший просто не зустрічає іншу молекулу, якій вона може передати енергію звукових коливань. Таким чином, газ, яким може бути звичайне повітря, що знаходиться в стані середнього вакууму, практично не пропускає звукові хвилі, будучи чудовим звукоізолятором. Застосування вакуумованого звукоізолюючого шару, а тим більше в діапазоні тиску середнього вакууму, невідомо у відомих конструкціях стетоскопів і фонендоскопів, унаслідок чого варто вважати, що пропонуване рішення має істотні відмінності від відомих конструкцій.

Пропонована конструкція стереофонендоскопу представлена на кресленнях (у розрізі).

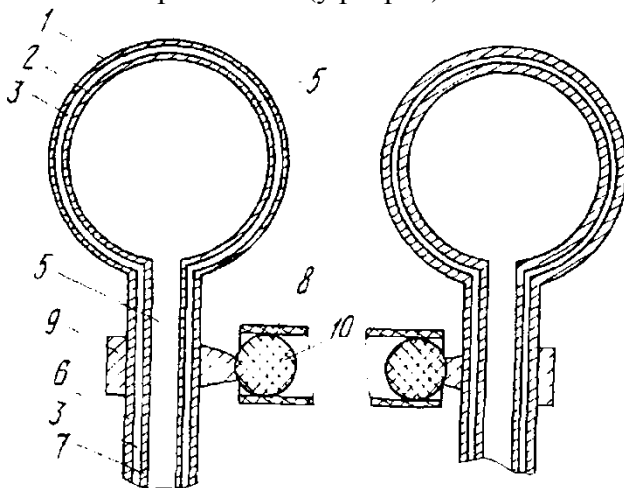
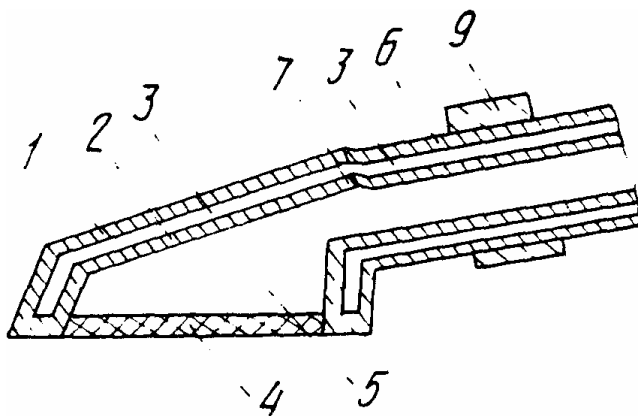


Рис. 5.8 – Стереофонендоскоп згідно [165] - поперечний переріз, вигляд зверху



*Рис. 5.9 – Стереофонендоскоп згідно [165] - поздовжній перетин, вигляд збоку*

Стереофонендоскоп [167] складається з пари звукопровідних елементів, кожен з яких містить голівку, що складається з зовнішнього чашеобразного корпуса 1, вставленого в нього з зазором внутрішнього чашеобразного корпуса 2, причому між корпусами 1 і 2 утворена порожнина, заповнена газом у стані середнього вакууму 3; мембрану 4, встановлену в голівці й утворюючу разом із внутрішнім чашеобразним корпусом 2 внутрішній звукопровідний простір (усередині голівки), заповнений атмосферним повітрям 5; звукопровід у вигляді зовнішньої трубки 6, вставленої в неї з зазором внутрішньої трубки 7, причому між трубками 6 і 7 утворена порожнина, заповнена газом у стані середнього вакууму 3, усередині внутрішньої трубки звукопроводу 7 існує внутрішній звукопровідний простір 5, що сполучається з внутрішнім звукопровідним простором 5 усередині голівки. Крім цього, існує сполучна ланка у вигляді еластичної трубки 8 і розрізне з'єднання у вигляді

двох тримачів, установлених на зовнішніх трубках 6 кожного звукопроводу 9, тримачі мають на кінцях фіксатори сферичної форми, виготовлені з пластмаси 10.

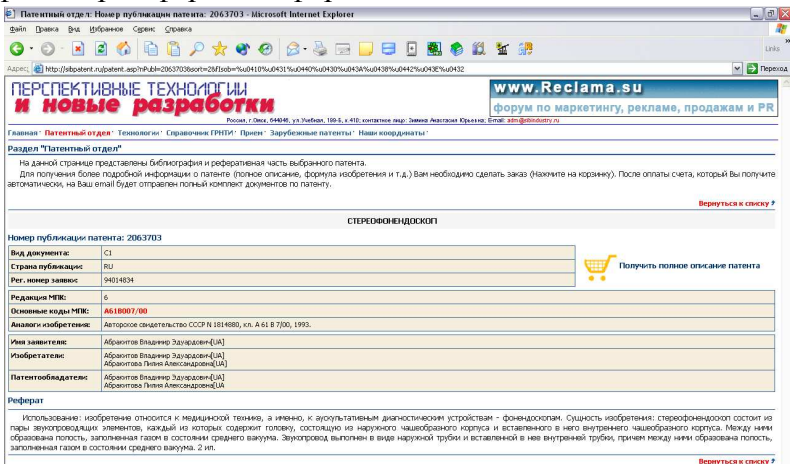
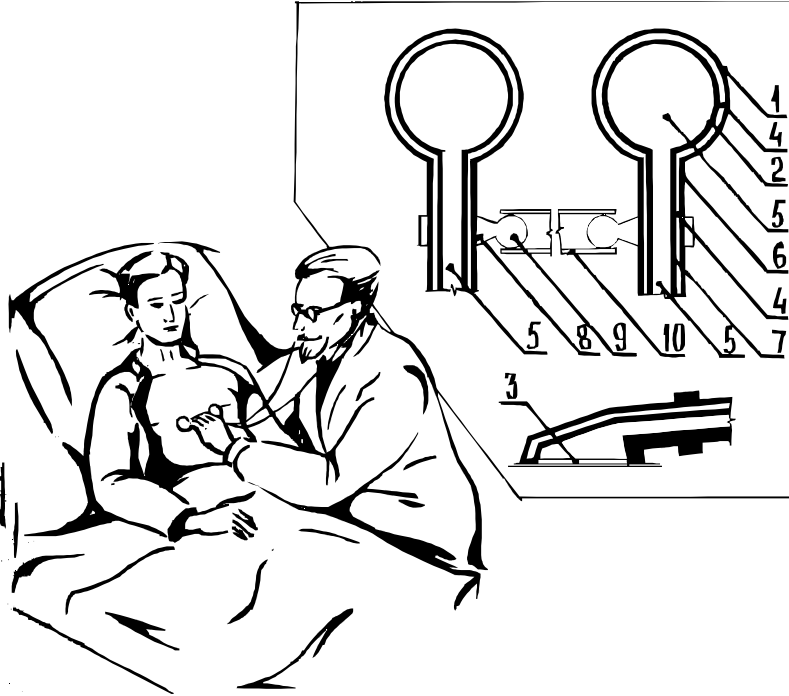


Рис. 5.10 – Офіційна публікація в Інтернет патентного документу [164] за веб-адресою [168]

Стереофонендоскоп експлуатують у такий спосіб. Провівши аускультацию, здійснюють прикладання (легке торкання) голівки до поверхні тіла хворого над органом, що прослухується. При цьому через мембрану 4, що безпосередньо прилягає до зовнішніх покривів тіла (шкірі) людини, у внутрішній звукопровідний простір (усередину голівки), заповнене атмосферним повітрям 5 і обмежене корпусом 2 голівки, подається звуковий сигнал, що прослухується. Далі зазначений сигнал подається у внутрішній звукопровідний простір (усередині звукопроводу), заповнене атмосферним повітрям 5, обмежене трубкою 7 звукопроводу. В остаточному підсумку зазначений сигнал прослухується лікарем, що здійснює аускультацию. Потрапивши у внутрішній звукопровідний простір 5, звуковий сигнал, що

прослухується, поширюється в строго заданому напрямку, а втрати (ослаблення) на пропущення звуку з внутрішнього звукопровідного простору 5 наприклад, через корпус голівки, практично усуваються, завдяки тому, що голівка має подвійний корпус (зовнішньої корпус 1 і внутрішній 2) з утворенням між ними порожнини, заповненої газом у стані середнього вакууму 3. Така конструкція практично не пропускає звук із внутрішнього звукопровідного простору 5 у незапланованих напрямках (назовні в навколишнє середовище). Аналогічним чином діє і звукоізоляція звукопроводу, що складається з зовнішньої 6 і внутрішньої 7 трубок, причому між ними утворена порожнина, заповнена газом у стані середнього вакууму 3. Оскільки утрати звукової енергії усунуті, корисний звуковий сигнал практично не послабляється, і лікарю не потрібно особливої напруженості слухових органів при проведенні аускультатії. Більш того, зовнішній шум і перешкоди, завдяки відмінній звукоізоляції, також не можуть проникнути ззовні у внутрішній звукопровідний простір 5, і не заважають тому проведенню аускультатії. У залежності від положення тримачів 9 зі сферичними фіксаторами 10 щодо сполучної ланки у вигляді еластичної трубки 8 забезпечується зміна положення одного звукопровідного елемента щодо іншого, тобто це з'єднання створює зручність користування стереофонендоскопом.



*Рис. 5.11 – Удосконалена конструкція стереофонендоскопу згідно [164]:*

- Головка стереофонендоскопу (2 шт.):
- 1. Зовнішній чашеобразний корпус; 2. Внутрішній чашеобразний корпус; 3. Еластична мембрана; 4. Вакуумована порожнина;
- 5. Внутрішня порожнина;
- Звукопровід (2 шт.):
- 4. Вакуумована порожнина; 5. Внутрішня порожнина;
- 6. Зовнішня трубка; 7. Внутрішня трубка;
- Рознімальне з'єднання (1 шт.):
- 8. Тримачі; 9. Фіксатори (сферичної форми); 10. З'єднувальна ланка.

Пропонований стереофонендоскоп, що забезпечує найменше перекручування корисного звукового сигналу при аускультатії з усіх відомих фонендоскопів, незамінний при діагностиці: захворювання серця - у кардіологічних і кардіохірургічних клініках, захворюваннях легень - у

пульманологічних клініках, захворювань різних суглобів і великих судин у травматологічних клініках.

### **5.6. Пристрій вибірного прийому звукових хвиль**

Пристрій вибірного прийому звукових хвиль Абракітова В.Е. згідно [169, 170] відноситься до акустичних пристроїв, а саме до контрольних пристроїв для вимірів акустичних характеристик конструкцій, пристроям для спрямованого прийому звукової енергії при звукозаписі і т.п.

Найбільш близьким до пропонованого є пристрій виборчого прийому звукової енергії [171].

Так ще, наприклад, відомий пристрій виборчого прийому звукової енергії [171], що містить мікрофон, поміщений у звукоізолюючий бокс із прийомним вікном, обрамленим по периметрі виброізолюючою прокладкою, і звуковбирний матеріал, причому звукоізолюючий бокс виконаний у вигляді еліпсоїда обертання, причому центр прийомного вікна збігається з одним з фокусів еліпсоїда обертання, а мікрофон і звуковбирний матеріал розташовані поблизу іншого його фокуса. Недоліками його є низька чутливість і вибірковість, а також неприйнятна частотна характеристика. Це порозумівається низькою звукоізолюючою здатністю звукоізолюючого боксу, тому що його конструкція не захищає внутрішній простір, де розташований мікрофон, від проходження через стінки зазначеного боксу сторонніх (що заважають прийому) звукових коливань. Справа в тім, що звукові хвилі, відповідно до їх відомого визначення, являють собою гармонійні коливання в зазначеному пружному середовищі (до якої відноситься і корпус такого боксу). Для усунення зазначеного недоліку необхідно підвищити звукоізолюючу

здатність стінок боксу, але в описаній конструкції це зробити неможливо (звукові хвилі з успіхом поширюються в твердих тілах і матеріалах).

Таким чином, головними недоліками його є низька чутливість і вибірковість, а також неприйнятна АЧХ, що випливає з низької звукоізолюючої здатності звукоізолюючого боксу.

Завданням нашого винаходу є підвищення чутливості і вибіркової пристрою і поліпшення його частотної характеристики за рахунок підвищення звукоізолюючої здатності стінок боксу (тобто огороження його від сторонніх шумів з різними частотами, що впливають на нього з незапланованих напрямків (позаду, збоку і т.п.)).

Завдання вирішується за рахунок того, що в пристрої виборчого прийому звукових хвиль, що містить мікрофон, поміщений у звукоізолюючий бокс із прийомним вікном, обрамленим на периметрі виброізолюючою прокладкою, і звуковбирний елемент, причому звукоізолюючий бокс виконаний у вигляді еліпсоїда обертання, центр прийомного вікна сполучений з одним з фокусів еліпсоїда обертання, центр мікрофона збігається з іншим його фокусом, елемент, причому звукоізолюючий бокс виконаний у вигляді еліпсоїда обертання, центр прийомного вікна зупадає з одним з фокусів еліпсоїда обертання, центр мікрофона збігається з іншим його фокусом, звуковбирний елемент розташований з тильної сторони мікрофона так, що його лицьова поверхня збігається з фокальною площиною еліпсоїда обертання, відповідно до формули винаходу [169, 170], звукоізолюючий бокс являє собою оболонку у вигляді вакуумної судини, у просторі між стінками якого вакуум

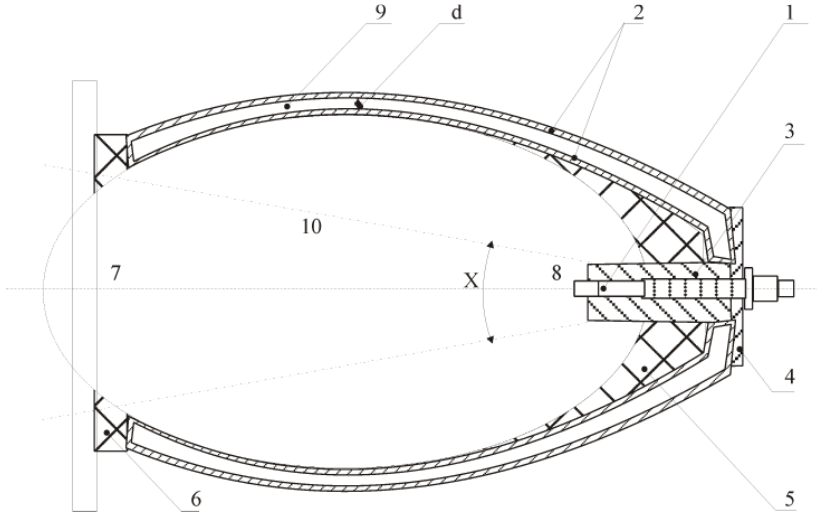
задовольняє умові  $l > d$ , де  $d$  - найменша відстань між стінками звукоізолюючого боксу, м,  $l$  - довжина вільного пробігу молекул, м.

Завдяки такому виконанню, звукоізолюючий бокс практично не пропускає сторонні звукові хвилі в не відведених для цього місцях (наприклад, через сам корпус боксу). Усередину боксу звукові хвилі, на відміну від прототипу, можуть проникнути тільки через спеціально передбачене для цієї мети прийомне вікно. Крім того, пропонований пристрій володіє також властивістю концентрувати звукову енергію усередині звукоізолюючого боксу.

Вимірювальний конденсаторний мікрофон 1 встановлений в еліптичному звукоізолюючому боксі 2. Вузол 3 кріплення мікрофону вмонтований в кришку 4 та занурений в товщу звуковбирного матеріалу 5. Пружна кільцева гумова прокладка 6 обрамляє периметр (звуко-)приймного вікна, віброізолює пристрій від вібрацій випромінюваної поверхні (при вимірі, звукозаписі так названого повітряного звуку - не потрібна). Площина (звуко-)приймного вікна і передня поверхня звуковбирного елемента 5 рівнобіжні одна іншій і проходять через фокуси 8 еліпсоїда, симетрично відтинаючи від нього кінцеві частини. Звукоізолюючий бокс 2 являє собою оболонку у вигляді вакуумної судини, у просторі 9 між стінками якого підтримується середній вакуум (з дотриманням зазначеної умови  $l > d$ ). Усередині звукоізолюючого боксу утвориться простір 10, де концентруються звукові хвилі, потрапляючи туди через прийомне вікно 7 і де знаходяться перелічені елементи 1, 3, 5, а також фокуси 8. Цей простір 10 заповнений



атмосферним повітрям. Кришка 4 знаходиться зовні звукоізолюючого боксу 2, а вузол кріплення мікрофона 3 виконаний таким чином, що дозволяє оперативно витягати мікрофон, фіксувати його на визначеному місці на осі пристрою і т.п.



*Рис. 5.12 – Пристрій вибірного прийому звукових хвиль Абракітова В.Е. згідно [169]: 1- приймач звукового тиску (мікрофон); 2 - звукоізолюючий бокс у формі еліпсоїда обертання; 3 - вузол кріплення мікрофона; 4 - кришка на тильній стороні боксу 2; 5 - звуковбирний матеріал; 6 - пружна кільцева прокладка, герметизує; 7 - прийомне вікно; 8 - фокус еліпсоїда; 9 - вакуумований простір (з дотриманням умови  $l > d$ ); 10 - внутрішній простір звукоізолюючого боксу 2*

Корпус звукоізолюючого боксу 2, що представляє собою оболонку у вигляді вакуумної судини, виконаної з матеріалу, що має достатню міцність для підтримки між його стінками в просторі 9 середнього вакууму, а також сама по собі характеризується високою звукоізолюючою здатністю і малим  $\alpha$ , наприклад, виготовленої з металу. Середній вакуум у просторі між стінками 9 звукоізолюючого боксу характеризується незначним

перевищенням довжини вільного пробігу  $l$  молекул над найменшою відстанню між стінками  $d$ . При цьому відсутні умови для передавання звукової енергії між зазначеними стінками боксу 2 за рахунок відсутності в цьому просторі 9 елементів пружного середовища, здатних проводити звукові хвилі. Одержавши кінетичну енергію звукових коливань, окрема части ця, що знаходиться в зазначеному просторі, на всьому шляху між стін не зустрічає іншу молекулу, що могла б втягнути в коливальний рух, за рахунок якого можлива передача енергії (за умови  $l > d$  імпульс, що переноситься, пропорційний кількості молекул, здатних його переносити, і звертається в нуль при повному вакуумі, за рахунок чого забезпечується звукоізолююча здатність  $R = + \infty$  дБ звукоізолюючого боксу). Звукові коливання, що надходять у звукоізолюючий бокс 2 під різними (від  $0^\circ$  до  $90^\circ$ ) кутами щодо його подовжньої осі, відбиваються від внутрішніх бічних поверхонь таким чином, що в місці розташування мікрофона 1 відбувається концентрація акустичної енергії вимірюваного чи записуваного сигналу (звукових хвиль). Можливі варіанти іншого розташування прийомного вікна (центр зазначеного вікна не збігається з одним з фокусів еліпсоїда обертання), за рахунок чого можна варіювати характеристикою спрямованості прийому, задаючи її відповідно з необхідними значеннями. Звуковбирний матеріал 5 поміщений за межі області між фокусами і покликаний усувати небажані резонансні явища усередині звукоізолюючого боксу 2, у його просторі 10.

Порядок роботи з пристроєм наступний.

Мікрофон 1 підключають до комплекту апаратури для акустичних вимірів або звукозаписному пристрою

(магнітофону). Роблять калібрування всього тракту, після чого мікрофон встановлюють у звукоізолюючому боксі 2. При дослідженні структурного звуку від вібруючої поверхні звукоізолюючий бокс притискається до такої вібруючій поверхні завдяки наявності пружної кільцевої гумової прокладки 6. При вимірі і записі повітряного звуку зазначена прокладка 6 не потрібна. У такому випадку пристрій виборчого прийому звукових хвиль просто орієнтують прийомним вікном у потрібному напрямку на джерело звуку.

Звукове випромінювання, проходячи через прийомне вікно в простір 10, сприймається мікрофоном 1 і далі реєструється й аналізується відомими методами. Діаграма спрямованості мікрофона представлена тілесним кутом  $\chi$ . Запропонований пристрій за рахунок зниження так званої бічної чутливості мікрофона дозволяє здійснити виборчий прийом звукового сигналу до умов сильних перешкод. При цьому сторонні випромінювання звуку можуть бути дорівнюють корисному сигналу чи навіть перевищувати його на 25-35 дБ, але за рахунок ідеальної (гранично можливої) звукоізоляції звукоізолюючого боксу вони "відтинаються". У відомих пристроях аналогічного призначення перевищення перешкод над корисним сигналом виключає можливість виконання вимірів, звукозапису й ін.

Винахід може знайти дуже широке застосування в звукозаписній апаратурі, у т.ч. професійної і побутової, а також в акустичних вимірах характеристик як повітряного, так і структурного звуку, а також при вимірах звукоізолюючої здатності огорожень на судах, у залізничному транспорті, в авіації, у промисловому і

цивільному будівництві.

Ефект від використання винаходу полягає в підвищенні якості магнітофонних і інших записів звуку, зниженні трудомісткості і підвищенні якості вимірів при розробці заходів щодо боротьби з акустичними шумами.

### **5.7. Звукоізолююча панель з максимально можливою звукоізолюючою здатністю**

Звукоізолююча панель з максимально можливою звукоізолюючою здатністю згідно [130] відноситься до технічних засобів боротьби із шумом на шляху його поширення шляхом звукоізоляції, тобто до звукоізолюючих панелей.

Найбільш ефективним є використання таких панелей як конструкція, що огорожує, в так званих ревербераційних камерах, де потрібно забезпечити як можна більше багаторазове відбиття звуку (тобто великий коефіцієнт відбиття і малий коефіцієнт пропущення звуку через конструкцію, що обгороджує).

Відомий, наприклад, пристрій, що має дві стінки з розміщеної між ними по периметрі пружною прокладкою, з можливістю вакуумування внутрішнього простору, причому стінки виконані у вигляді частини сфери, зверненою опуклістю назовні, а між стінками і прокладкою розміщені віброізолюючі опори у вигляді жорстко з'єднаних зі стінками металевих рамок [174]. Він послужив в якості прототипу для наших подальших розробок - винаходу [130] та ін.

Прототип винаходу має цілий ряд недоліків, а саме: невелика звукоізолююча здатність і неможливість у технічній реалізації відповідно до опису (докладно див. [130]).

Прототип винаходу має цілий ряд недоліків, а саме: невелика звукоізолююча здатність і неможливість у технічній реалізації відповідно до опису, тому що в матеріалах прототипу:

- відсутній опис вузлів кріплення такого звукоізолюючого елемента до будівельних конструкцій спорудження, до яких він кріпиться, а при довільному їхньому виконанні створюються сприятливі умови для поширення через них так названого структурного звуку, що робить безглуздим підвищення звукоізолюючої здатності інших структурних елементів прототипу,
- відсутня яка-небудь характеристика вакууму у внутрішньому просторі, а з непрямої вказівки на те, що вакуум погано проводить звук, яка мається в описі прототипу, випливає, що, мабуть, у прототипі використаний низький вакуум, що володіє малою звукоізолюючою здатністю, можливість використання середнього вакууму не передбачена, відсутній взаємозв'язок між найменшою відстанню між стінками внутрішнього простору і довжиною 1 вільного пробігу молекул,
- зменшення тиску у внутрішній порожнині до діапазону тисків середнього вакууму неможливо, тому що корпус прототипу не цільний, а складений (у цьому випадку буде мати місце втрата герметичності пружною прокладкою, розміщеної по периметрі стінок корпуса),
- має місце втрата здібностей, що демпфують, цією пружною прокладкою через виникнення в ній напруження стиску (прокладка надмірно стиснута через велику різницю в тисках між зовнішньою атмосферою і вакуумом у внутрішньому просторі).

Крім того, область застосування прототипу обмежується ілюмінаторами в літаках, кабінах управління і кожухом машин (обмежується формулою прототипу, а саме заданою формою його корпусу, у той час як ця форма ніяк не впливає на величину звукоізолюючої здатності прототипу, але утрудняє експлуатацію, погіршує дизайн і т.п.)

Найголовнішим критерієм, що визначає ефективність заходів боротьби із шумом, є підвищення звукоізолюючої здібності шумозахисних засобів.

Метою нашого винаходу є підвищення звукоізолюючої здатності до максимально можливої величини [130, 175].

Поставлене завдання досягається тим, що звукоізолююча панель з максимально можливою звукоізолюючою здатністю відповідно до формули винаходу [130] має корпус панелі, виконаний цільним і герметичним, зі звукобирною прокладкою, розташований як на лицьовому, так і на тильному боках панелі; у корпусі і на несучих конструкціях спорудження, до яких прикріплена панель, розміщені магніти, що утворюють безконтактні вузли кріплення (магнітну підвіску), параметри зазначених магнітів (поляристість і напруженість полю магнітів) підібрані таким чином, що між корпусом панелі і несучими конструкціями спорудження, до яких закріплена панель, утворений проміжок, заповнений атмосферним повітрям, а у внутрішній порожнині панелі забезпечена наявність середнього вакууму, що характеризується рівністю чи незначним перевищенням довжини вільного пробігу молекул  $l$  над найменшою відстанню  $d$  між стінками внутрішньої порожнини.

Також завдання досягається тим, що в конструкції

безконтактних вузлів кріплення використані електромагніти.

Також завдання досягається тим, що корпус панелі виготовлений із фторопласта, армованого металом, причому арматура корпусу використовується в якості частини безконтактного вузла кріплення як обмотка вхідного в його склад електромагніта.

Під підвищенням звукоізолюючої здатності розуміється в першу чергу зменшення  $\tau$ . Як вже згадувалося вище, (наприклад, згідно [147, с. 58]), всяке огородження характеризується величиною звукоізолюючої здатності, що пов'язує  $R$  та  $\tau$ ).

Технічний результат винаходу - повна мінімізація коефіцієнта пропущення звуку через внутрішню порожнину  $\tau = 0$ , що призводить до забезпечення максимально можливої звукоізолюючої здатності  $R = \infty$  дБ. Крім того, за рахунок обговореної конструкції безконтактних вузлів кріплення запобігається передача структурного звуку на несущі конструкції спорудження, до яких прикріплена панель. Середній вакуум у внутрішній порожнині забезпечує неможливість пропущення звуку скрізь неї. Коли тиск газового середовища поширення звукових хвиль зменшується в порівнянні з атмосферним (низьким вакуум), передача звукової енергії зменшується, але не припиняється цілком (прототип). Коли ж у середовищі поширення звуку створений середній вакуум, воно втрачає властивість пружності, і пропущення звуку через нього припиняється цілком. Це теоретичне положення цілком підтверджується роботою [146, с. 84], де прямо зазначено, що за умови середнього вакууму, тобто при рівності довжини вільного пробігу молекул і

характерного розміру процесу (відстані між стінками судини), – імпульс, що переноситься, пропорційний числу молекул, здатних його переносити, і звертається в нуль при повному вакуумі.

Цільний і герметичний корпус пропонованої панелі забезпечує підтримку в її внутрішній порожнині середнього вакууму на весь розрахунковий термін її експлуатації.

Оскільки частина звукової енергії може поширюватися через корпус у виді так називаного структурного звуку і через вузли кріплення переходити на несучі конструкції спорудження, до яких прикріплена панель, передбачені безконтактні вузли кріплення з повітряним проміжком між корпусом панелі і несучими конструкціями, що запобігає поширенню структурного звуку.

Додаткове зниження шуму забезпечується звукобивною прокладкою, розміщеною як на лицьовій (куди спочатку попадає звукова хвиля), так і на тильній (протилежній) сторонах панелі (де вона запобігає переходу звукової енергії в заповнений повітрям проміжок між корпусом і несучими конструкціями спорудження).

У конструкції безконтактних вузлів кріплення можуть бути використані як постійні магніти, так і електромагніти (що більш технологічно і зручно), але їхні параметри повинні бути підібрані таким чином, щоб забезпечувалася відсутність прямого механічного контакту між корпусом панелі і несучими конструкціями спорудження (за зазначеними вище причинами). Корпус панелі виготовлений з матеріалу з великим коефіцієнтом звукопоглинання (що збільшує ефективність панелі), а саме фторопласта, що до того ж є ідеальним матеріалом



для вакуумних судин (традиційно використовується для їхнього виготовлення через малу газопроникність і ін.), у який для забезпечення більшої міцності замурована арматура. Ця арматура може бути використана як обмотка електромагніту, що входить до складу безконтактного вузла кріплення.

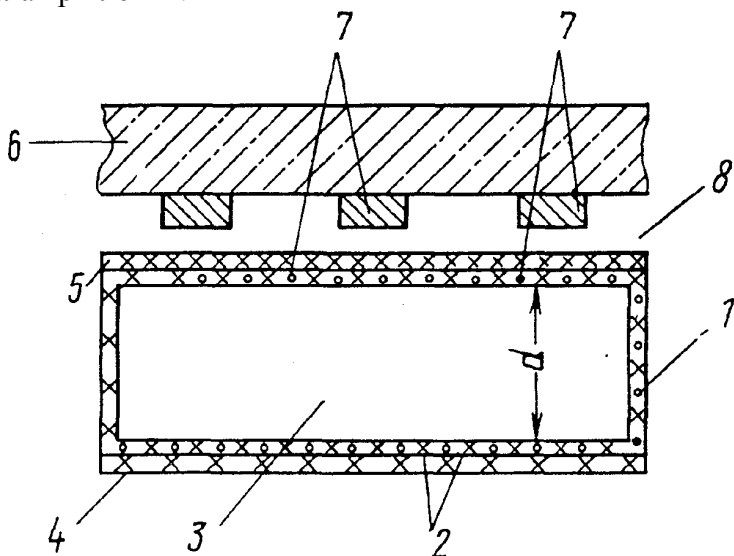


Рис. 5.13 – Звукоізолююча панель з максимально можливою звукоізолюючою здатністю згідно [130], розріз

До складу звукоізолюючої панелі з максимально можливою звукоізолюючою здатністю входять цільний і герметичний корпус 1, виготовлений із фторопласта, у який замурована арматура 2 з металу, із внутрішньою порожниною 3 (що характеризується найменшою відстанню  $d$  між її стінками), у якій забезпечена наявність середнього вакууму з дотриманням умови  $l \geq d$ , що має (корпус 1) звуковбирні прокладки на лицьовій 4 і тильній 5 сторонах, при цьому в корпус 1 і несущі конструкції спорудження, до яких він прикріплений 6, установлені

магніти (електромагніти) 7, їхня полярність і напруженість магнітного поля підібрані таким чином, щоб був відсутній прямий механічний контакт - між корпусом 1 і несущими конструкціями 6 і між ними був утворений проміжок 8, заповнений повітрям.

Пристрій працює в такий спосіб. Загальний вхідний потік звукової енергії  $\Phi_{\text{вх}}$ , що попадає на лицьову сторону корпуса панелі, згідно закону збереження енергії частково відбивається назад у навколишнє середовище:  $\Phi_{\text{відб}}$ , частково поглинається речовиною корпуса 1 панелі і звуковбирною прокладкою 4, спеціально встановленою на ній:  $\Phi_{\text{погл}}$ , частково пропускається крізь панель:  $\Phi_{\text{проп}}$ .

$$\Phi_{\text{вх}} = \Phi_{\text{відб}} + \Phi_{\text{погл}} + \Phi_{\text{проп}}. \quad (5.3)$$

Задача винаходу - зменшення  $\Phi_{\text{проп}}$ , виконується за рахунок того, що основна частина  $\Phi_{\text{проп}}$  загасає при улученні у внутрішню вакуумовану порожнину 3 через відсутність у ній елементів пружного середовища, тобто умов поширення звуку.

Однак частина  $\Phi_{\text{проп}}$  у виді структурного звуку поширюється по інших елементах панелі, тобто по корпусі 1. Оскільки корпус 1 виготовлений із фторопласта, тобто матеріалу з великим  $\alpha$ , ця частина  $\Phi_{\text{проп}}$  переходить у  $\Phi_{\text{погл}}$ . Крім того, на тильній стороні панелі мається звуковбирна прокладка 5, що запобігає поширенню звуку з тильної сторони.

Недолік прототипу - поширення структурного звуку через вузли кріплення виправлений за рахунок наявності безконтактних вузлів кріплення (у виді магнітної підвіски). Оскільки параметри магнітів підібрані таким чином, що між тильною стороною корпуса 1 і несущими конструкціями спорудження 6 утворений проміжок 8,

заповнений повітрям, умови, сприятливі для поширення в ньому звуку, відсутні. Коливання панелі щодо нерухомих несущих конструкцій 6 гасяться магнітами 7. У такий спосіб забезпечується повна мінімізація коефіцієнта пропущення звуку  $\tau = 0$  і максимально можлива звукоізолююча здатність  $R = \infty$  дБ. Додатково можливо установити звукобирні прокладки не тільки на лицьовій і тильній сторонах, але і на бічних сторонах панелі.

Звукоізолююча панель з максимальною можливою звукоізолюючою здатністю можлива в технічній реалізації.

Магнітна підвіска (безконтактні вузли кріплення) відомі, наприклад, стосовно до рейкового транспорту [104, с. 267]. Відомі також подібні вузли кріплення предметів щодо спорудження, але не з метою боротьби із шумом [177]. Так, засновник ісламу пророк Мухаммед був похований у залізній труні. В усипальниці пророка знаходиться нібито «особливий камінь», (тобто магніт), що і тримає в ширяючому стані залізну труну. Ясніше говорячи, сила магнітного притягання повинна бути такою, щоб її вистачило підняти труну над підлогою, і було недостатньо, щоб притягти залізну шухляду з порохом до стелі, у якої захований магніт.

Корпус 1 пропонованої панелі виготовлений з дотриманням вимог, пропонованих до пристроїв вакуумної техніки, тобто забезпечує герметичність внутрішньої порожнини (для міцності армований металом).

Передача звукової енергії, тобто енергії пружних хвиль при цьому здійснюється за рахунок зіткнень сусідніх часток при їх коливаннях. Фізичний зміст явища полягає в тому, що звукові хвилі здатні поширюватися практично в будь-якому середовищі, що володіє властивістю

пружності, тобто в будь-якому відомому матеріалі. У зв'язку з цим боротьба із шумом на шляху його розповсюдження стає скрутною.

Єдиною перешкодою на шляху звуку може бути середовище, позбавлене пружності, тобто вакуум. Ця ідея реалізована в цілому ряді відомих звукоізолюючих пристроїв (звукоізолюючих панелей), що містять порожнину з вакуумом усередині твердого корпусу (наприклад, [132]). Згідно [104, с. 67 - 68] вакуум являє собою стан укладеного в судину газу з тиском значно нижче атмосферного, і поведження його визначається співвідношенням між довжиною вільного пробігу молекул  $l$ , (середньою відстанню, що проходить частка між двома її послідовними зіткненнями з іншими частками), і розміром  $d$ , характерним для даної вакуумної судини чи процесу. Причому для забезпечення коефіцієнта пропущення звуку  $\tau = 0$  необхідна наявність, щонайменше, середнього вакууму, коли виконується умова  $l = d$  (тиск порядку  $10^2 > P > 10^{-1}$  Па) по досягненні якого припиняється пряма передача енергії звукових коливань від однієї частки пружного середовища до іншої між стінками судини. У роботі [99] наводиться формула для розрахунку довжини вільного пробігу молекул  $l$ :

$$\ell = KT / (\pi \sqrt{2} D^2 P), \quad (5.4)$$

де  $l$  - середня довжина вільного пробігу молекул, м;  $K = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – постійна Больцмана;  $P$  - шуканий тиск газу, Па;  $D$  - діаметр молекули речовини, м;  $T$  - абсолютна температура, К.

Вищевказане теоретичне положення цілком підтверджується роботою [146], де зазначено, що якщо газ настільки розріджений, що виконується умова  $d \leq l$ , то

“молекулы непосредственно переносят импульс от одной пластинки к другой, ни с чем не сталкиваясь по дороге, и переносимый импульс пропорционален числу молекул, способных его переносить, и обращается в нуль при полном вакууме”. Як уже відзначалося вище, ці принципи використовують при конструюванні звукоізолюючих пристроїв з вакуумом.

Необхідний тиск у його внутрішній порожнині  $Z$  може бути обчислений в такий спосіб (щоб забезпечити умову  $l \geq d$ ). Згідно [99, с. 204] відомо, що довжина вільного пробігу молекул відповідно до кінетичної теорії газів визначається за формулою (5.4). При цьому  $K/\pi\sqrt{2} = 3,11 \cdot 10^{-24}$  Дж/К. Знаючи реальну величину для умови  $l \geq d$  згідно (5.4) розраховують необхідний тиск у внутрішній порожнині для газу (в основному повітря), підставляючи у формулу (5.4) відому величину діаметра молекули, і температури газу, характерної для умов експлуатації. Як правило, необхідний тиск лежить у діапазоні  $10^2 > P > 10^{-1}$  Па. У конструкції використані будь-які види звуковбирних матеріалів з відомих.

Звукоізолююча панель з максимальною можливою звукоізолюючою здатністю можлива в технічній реалізації. Елементи конструкції (безконтактні вузли кріплення) згідно [130] відомі стосовно до рейкового транспорту [104, с. 267]. Відомі також подібні вузли кріплення предметів щодо спорудження, але не з метою боротьби із шумом [177]. У конструкції використані будь-які види звуковбирних матеріалів з відомих. Звукоізолююча панель з максимальною можливою звукоізолюючою здатністю є найбільш ефективним засобом звукоізоляції з можливих засобів (згідно з [178]).

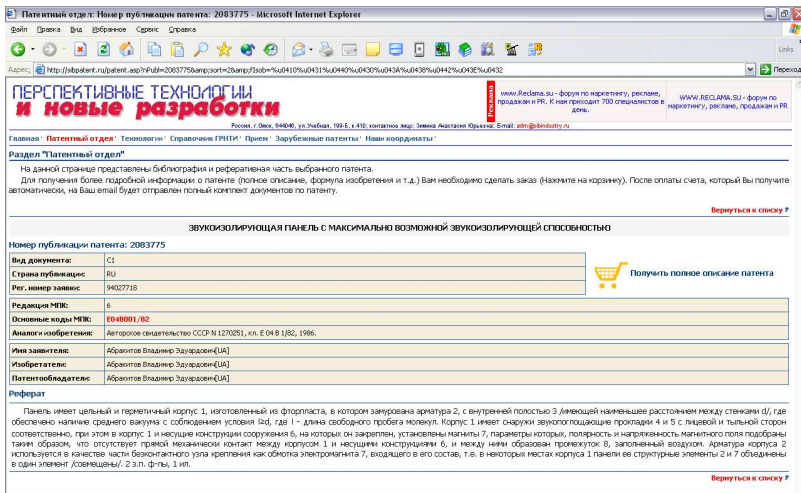


Рис. 5.14 – Офіційна публікація в Інтернет патентного документу [130] за веб-адресою [176]

Таким чином, на підставі вищевказаного можна говорити про винахід і створення на підставі наукової теорії автора звукоізолюючої панелі з максимально можливою звукоізолюючою здібністю [130, 175], що являє собою принципово граничний технічний результат, (який можна тільки повторити якимось іншими засобами, але не перевершити), тобто це – саме "стеля" в цій галузі!

## 5.8. Застосування наших винаходів в науково-технічній діяльності інших дослідників

Наші наукові досягнення підштовхнули інших науковців. Говорячи про звукоізолюючу панель з максимально можливою звукоізолюючою здатністю, просто неможливо не згадати її інженерно-технічне прикладення згідно з роботою [179]. Автори [179] були зацікавлені нашою ідеєю (про що вони пишуть в своїй статті), що навело їх на дещо несподіване застосування її в конструкторській діяльності.

ції кабіни для конфіденціальних переговорів. Слід сказати, вихідними даними для проектування для авторів [179] є наша конструкція (рис.5.15)

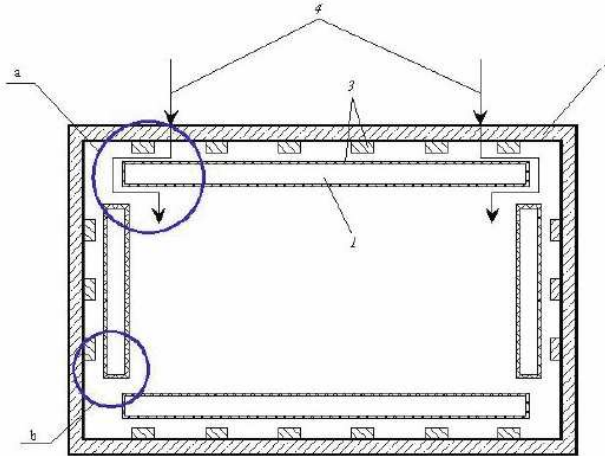


Рисунок 2. Звукоізоляція помещения с помощью конструкции Абрамитова В.Э.

1 – вакуумная звукоизолирующая панель; 2 – несущая конструкция;  
3 – магниты; 4 – шумы.

*Рис. 5.15 – Скановане зображення з статті [179] «Инженерно-строительного журнала»: креслення нашої конструкції за версією авторів [179] та оригінальні підписані підписи до неї в незмінному вигляді (в системі нумерації креслень роботи [179] йде за № 2, кресленням № 1 в ній є наш власний рис. 5.13)*

Кабіна для конфіденційних переговорів являє собою приміщення в приміщенні. Одне з них - звичайне приміщення установ бізнесу, владних структур або дипломатичного представництва. Друге - спеціальна звукоізольовуюча кабіна, де ведуться конфіденційні переговори, установлена усередині першого приміщення. На рис. 5.16 представлена схема, по якій замкнена прямокутна звукоізольовуюча оболонка кабіни навколо переговорників може досить ефективно акустично

ізолювати їх від навколишнього середовища звичайного приміщення. Автори застосовують технічний термін «звукоізоляція оболонки навколо переговорників»  $R$ , дБ, адекватний терміну «звукоізоляції стіни, підлоги стелі, вікон, дверей», яке визначається як різниця в дБ рівня інтенсивності звуку в звукових хвилях, що падають на перешкоду і рівня інтенсивності в звукових хвилях, що минули через перешкоду. При тому вони відрізняють його від терміну «Звукоізоляція переговорників», (що є різницею в дБ між рівнем звуку людей, що підслухують, у розрахунковій точці, коли переговорники не мають звукоізолюючої оболонки, і рівнем звуку переговорників зі звукоізолюючою оболонкою навколо них), який (себто «звукоізоляція переговорників») використовується при вимірі ефективності вже виготовленої звукоізолюючої kabіни. Термін «звукоізоляція оболонки навколо переговорників», за думкою авторів [179], може бути застосований у процесі проектування. Розглянемо наступну типову ситуацію, коли замкнена звукоізолююча оболонка навколо джерела звуку переговорників як крапкового випромінювача акустично ізолює їх від навколишнього простору людей, що підслухують, у якому звукове поле практично близьке до дифузійного. У першому просторі (з індексом «1») перебувають центр джерела зі звуковою потужністю  $W_1$ , Вт, і на деякій відстані від нього - звукоізолююча замкнена оболонка із площею  $S_{об}$ , м<sup>2</sup>. Це - головна частина звукоізолюючого боксу. У другому приміщенні для, що підслухують (з індексом «2») на відстані  $r_2$ , м, від центру переговорників з оболонкою перебуває розрахункова точка, де повинна бути виконана норма звуку для неможливості підслуховування



$L_n$ , дБ. Тоді інтенсивність звуку, що падає на звукоізолюючу оболонку з першого простору по напрямкові до другого, запишеться так:

$$J_1 = W_1 \left( \frac{\chi_1 \tilde{\chi}}{S_{OB}} + \frac{1}{\kappa_1 Q_1} \right).$$

Середня величина відстані від центру переговорників до розрахункової точки знаходження людей, що підслухують, розраховується за формулою:

$$r_1 = \sqrt{\frac{S_{OB}}{2\pi}}.$$

Коефіцієнт звукоізоляції оболонки дорівнює відношенню інтенсивності звуку у хвилях, що падають на оболонку до інтенсивності в хвилях, що минули через неї, а саме:

$$r = \frac{J_1}{J_{21}}.$$

Потужність звуку, випромінювана оболонкою площею  $S \text{ м}^2$ , у друге приміщення:

$$W_2 = J_{21} S_{OB} = \frac{J_1}{r} S_{OB} = W_1 \left( \frac{\chi_1 \tilde{\chi}}{S_{OB}} + \frac{1}{\kappa_1 Q_1} \right) \cdot \frac{S_{OB}}{r}.$$

Інтенсивність звуку в розрахунковій точці приміщення, де перебуває людина, що підслухує, виразиться залежністю:

$$J_2 = W_2 \left( \frac{\chi_2}{2\pi r_2^2} + \frac{4}{\kappa_2 Q_2} \right) = W_1 \left( \frac{\chi_1 \tilde{\chi}}{S_{OB}} + \frac{1}{\kappa_1 Q_1} \right) \cdot \frac{S_{OB}}{r} \left( \frac{\chi_2}{2\pi r_2^2} + \frac{4}{\kappa_2 Q_2} \right).$$

Прийmemo в подальших розрахунках

$$Q_1 = \frac{\alpha_1 S_{OB}}{1 - \alpha_1}, \quad Q_2 = \frac{\alpha_2 S_2}{1 - \alpha_2},$$

де  $\alpha_1$  й  $\alpha_2$  – коефіцієнти звукопоглинання на поверхнях  $S_{OB}$  і  $S_2$ . Тоді маємо

$$J_2 = W_1 \left( \frac{\chi_1 \tilde{\chi}}{S_{об}} + \frac{1 - \alpha_1}{\kappa_1 \alpha_1 S_{об}} \right) \cdot \frac{S_{об}}{r} \left( \frac{\chi_2}{2\pi r_2^2} + \frac{4}{\kappa_2 Q_2} \right) = W_1 \left( \chi_1 \tilde{\chi} + \frac{1 - \alpha_1}{\kappa_1 \alpha_1} \right) \cdot \frac{1}{r} \left( \frac{\chi_2}{2\pi r_2^2} + \frac{4}{\kappa_2 Q_2} \right)$$

Звідси одержуємо в розрахунковій точці приміщення 2 рівень звукового тиску  $L_{p(2)}$ , дБ, який повинен бути в цій точці менше норми припустимого звуку  $L_H$ , дБ. Виходить наступна формула зниження звуку шляхом установки звукоізоляції переговорників  $R$  дБ:

$$L_{p(2)} = L_{w(1)} + 10 \lg \left( \chi_1 \tilde{\chi} + \frac{1 - \alpha_1}{\kappa_1 \alpha_1} \right) + 10 \lg \left( \frac{\chi_2}{2\pi r_2^2} + \frac{4}{\kappa_2 Q_2} \right) - R_{тр} \leq L_H$$

Необхідна звукоізоляція переговорників  $R_{тр}$ , дБ, для виконання норми припустимого звуку  $L_H$ , дБ, виразиться формулою:

$$R_{тр} = L_{w(1)} + 10 \lg + 10 \lg \left( \chi_1 \tilde{\chi} + \frac{1 - \alpha_1}{\kappa_1 \alpha_1} \right) - L_H$$

Тут відразу слід зазначити, що величина  $L_H$  у дБ повинна дорівнювати нулю або бути навіть від'ємною. Тільки тоді буде надійно забезпечена відсутність підслуховування. Величина  $L_H$  визначається замовником.

У представленій формулі  $R_{тр}$ : величина  $\tilde{\chi}$  – виправлення на близьке поле в просторі між переговорниками й оболонкою, має значення, представлені в таблиці 5.2; величина  $\chi$  - коефіцієнт, що враховує вплив близького звукового поля, коли відстань  $r_i$  менше подвоєного максимального габариту джерела звуку переговорників;  $2I_{МАКС}$  має значення, представлені в таблиці 5.3; величина  $\kappa$  - коефіцієнт, що враховує порушення дифузності звукового поля в приміщенні залежно від середнього коефіцієнта звукопоглинання  $\alpha_{ср}$ , має значення, представлені в таблиці 5.4.

Таблиця 5.2 – Значення виправлення на близьке поле між переговорниками й оболонкою

Октавні смуги частот, Гц	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
$\bar{\chi}$	100	14	3	1	1	1	1	1	1

Остаточно маємо для спроектованої звукоізоляції  $R \geq R_{TP}$  такі розрахункові формули:

$$L_{p(2)} = L_{p(1)} + 10 \lg \left( \chi_1 \bar{\chi} + \frac{1 - \alpha_1}{\kappa_1 \alpha_1} \right) + 10 \lg \left( \frac{\chi_2}{2\pi r_H^2} + \frac{4}{\kappa_2 Q_2} \right) - R$$

$$L_{p(2)} < L_H$$

Таблиця 5.3 – Значення коефіцієнта впливу близького поля  $X$

$r/l_{\text{МАКС}}$	$\chi$
0,6 й менше	3,00
0,8	2,50
1,0	2,00
1,2	1,60
1,5	1,25
2,0 й більше	1,00

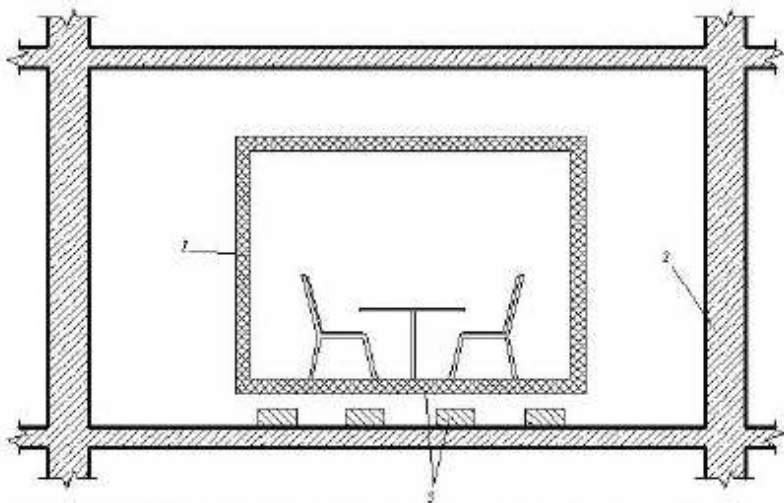
Таблиця 5.4 – Значення коефіцієнта порушення дифузності звукового поля  $K$

$\alpha$	$\kappa$
0,1 й менше	1,00
0,2	1,25
0,4	1,60
0,5	2,00
0,6 й більше	2,50

Головну частину кабіни по представлених формулах стає можливим спроектувати завжди й потім реалізувати звукоізоляцію від повітряного шуму. Складнішою є справа зі структурної складової звуку - передачею звукової енергії від підлоги боксу до підлоги офісу. Сучасні методи підслуховування можуть скористатися саме цим шляхом поширення мовної інформації.

Якщо необхідно кардинально припинити витік мовної інформації, як по шляхах повітряного звуку, так і по шляхах структурного звуку, автори [179] пропонують виконати кабіну із двох сталевих сферичних оболонок, викачавши повітря між стінками й підтримуючи внутрішню оболонку щодо зовнішньої за допомогою магнітної підвіски у зваженому стані. В іншому тут слід використовувати принципи конструювання звукоізолюючої прямокутної кабіни. Матеріалом оболонок крім сталі може стати дюралюміній, титан, склопластик, вуглепластик і їх комбінація. У такій кабіні звукоізоляція й від повітряного звуку, і від структурного звуку може бути як завгодно великою. Крім того, сферична кабіна є єдиним ефективним засобом ізоляції від інфразвуку. Інфразвук великої інтенсивності із частотою від 1 Гц до 5 Гц може виявити згубний вплив на людину, особливо на його розумові здатності. Тут це виключене. Кабіна сферичної форми з такою звукоізоляцією представлена на ілюстраціях в роботі [179].

Автори роботи [179] відзначають, що складнішою є справа зі структурною складової звуку - передачею звукової енергії від підлоги боксу до підлоги офісу.

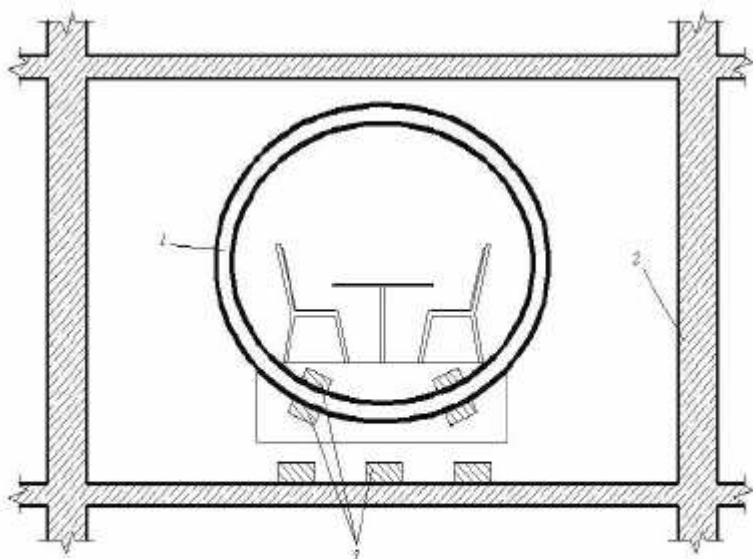


**Рисунок 3. Звукоизолирующая кабина для конфиденциальных переговоров прямоугольной формы конструкции Боголепова И.И. и Чэнь Сятина**

**1 – стенки кабины; 2 – стена помещения; 3 – магнитная подвеска**

*Рис. 5.17 – Скановане зображення з статті [179] «Инженерно-строительного журнала»: креслення нашої конструкції за версією авторів [179] та оригінальні підписані підписи до неї в незмінному вигляді*

Сучасні методи підслуховування можуть скористатися саме цим шляхом поширення мовної інформації. Звичайно для запобігання передачі структурного звуку використовують акустичні віброізолятори, установлені під боксом. Але краще, на думку авторів [179], в окремих випадках скористатися магнітною підвіскою Абракітова В.Е., що повністю виключає механічний контакт між кабіною й приміщенням. Вони пропонують використовувати магнітну підвіску в звукоізольованих прямокутних (рис. 5.17) та сферичних (рис. 5.17) кабінах для конфідентційних переговорів, виключивши витік мовної інформації, більш ефективно ізолювавши структурний звук.



**Рисунок 4. Сферическая кабина для переговоров особой важности конструкции Боголепова И.И. и Чэнь Сятина.**  
**1 – вакуум между двух сферических оболочек; 2 – стена помещения; 3 – магнитные подвески для изоляции от воздушного и структурного звука**

*Рис. 5.18 – Скановане зображення з статті [179] «Инженерно-строительного журнала»: креслення нашої конструкції за версією авторів [179] та оригінальні підписані підписи до неї в незмінному вигляді*

## **Висновки до розділу 5**

П'ятий розділ надає приклади технічної реалізації теоретичних передумов досліджень в галузі створення різноманітних пристроїв, що мають в своїй конструкції в якості складових частин елементи звукоізоляції, розроблені автором. Без сумніву, задля того, щоб боротися із шумом, потрібно знати: "де? як?" - але з точки зору забезпечення безпосереднього впливу на забезпечення акустичного комфорту куди більшу цікавість являють собою засоби задля зменшення шуму самі по собі.

Теоретичні засади, сформульовані в попередній частині, дозволяють розробити якісну і високоефективну звукоізоляцію стінок таких конструкцій на основі підбору матеріалів для шарів, з яких вони виготовлені, нанесення додаткового звуковбирного покриття на лицьову поверхню, вакуумування внутрішнього простору тощо.

Запропоновано застосувати такі авторські розробки із збільшення звукоізолюючої здібності в ряді пристроїв, що відносяться к багатьом галузям техніки та господарства: наприклад, для зменшення шумовипромінювання суден та кораблів - винахід «Шумоізолюючий кофердам» [131]; в медичній техніці при конструюванні приладів аускультативної діагностики – винахід «Стереофонендоскоп» [164, 165]; в вимірювальній техніці – винахід «Пристрій вибірного прийому звукових хвиль» [169].

Вінець багатогранної та багатопланової роботи із поліпшення шумозахисних властивостей різноманітних конструкцій – винахід і створення запатентованої «Звукоізолюючої панелі з максимально можливою звукоізолюючою здатністю» згідно [130], що являє собою принципово граничний технічний результат, тобто "стелю" в цій галузі, (який можна тільки повторити якимось іншими засобами, але не перевершити).

Наведені описи таких пристроїв згідно з патентними документами; креслення, що ілюструють авторські розробки; додаткові відомості про можливість варіації їхніх технічних параметрів в конкретних випадках, дані про застосування необхідних матеріалів при побудові пристроїв; найбільш важливі характеристики, та інші конструктивні особливості.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У цій роботі наведене теоретичне узагальнення і нове вирішення наукової проблеми, що виявляється в формуванні різноманітних заходів боротьби з шумом на шляху його випромінювання на базі моделювання різноманітних акустичних процесів.

Наукові результати роботи (відповідно чотирьом напрямкам досліджень) складаються в наступному.

Проведені дослідження щодо вдосконалення відомого напрямку в боротьбі з шумом на шляху його розповсюдження акустичними засобами, тобто звукоізоляцією.

Винайдено і створено оригінальний спосіб оперативного регулювання часу реверберації звуку в приміщеннях [128, 180], що дозволяє примусово змінювати параметри звукоізолюючої спроможності звукоізолюючих облицювань, при тому здійснено математичне пояснення процесів послаблення інтенсивності звукових хвиль у вакуумованому середовищі в динаміці примусової зміни їхніх параметрів, та виведено конкретну математичну формулу, що надає змогу розрахувати потрібні технічні умови, що характеризують вакуумовану порожнину (яка застосується для боротьби з шумом), зокрема, тиск газу в ній та ін. [128, 180] задля вищевказаного запатентованого способу оперативного регулювання часу реверберації звуку в приміщеннях.

Винайдено оригінальний спосіб ослаблення інтенсивності звукових хвиль [102, 110, 103], заснований на використанні явища поляризації звуку в пружному середовищі шумозахисного засобу, що базується на



запропонованому фізичному і математичному обґрунтуванні процесів ослаблення інтенсивності звуку в панелях з багатьма шарами матеріалу, що відбуваються при тім; конкретизовані найбільш оптимальні технічні умови, що характеризують різні шари матеріалу в таких панелях; запропонований алгоритм розрахунку їх ефективності і підбора параметрів при побудові такого роду звукоізолюючих конструкцій. Вивчено залежність між мікроструктурою пористих матеріалів та їхньою звукоізолюючою здатністю [121, 122]. На підставі вищевказаного винайдено і створено звукоізолюючу панель з максимально можливою звукоізолюючою здібністю [130], що являє собою принципово граничний технічний результат, (який можна тільки повторити якимось іншими засобами, але не перевершити), тобто це - "стеля" в цій галузі.

Розроблено і застосовано запропоновану автором оригінальну методику підвищення ефективності способів зниження шуму при конструюванні шумозахисних засобів. Вдосконалено традиційні конструкції звукоізолюючих панелей та елементів [172, 132]. Запропонована методика знайшла застосування при винаході і створенні шумоізолюючого кофердаму [131] – для боротьби із шумом в галузі суднобудування. Застосовано запропоновану автором методику підвищення ефективності способів зниження шуму не тільки при конструюванні шумозахисних засобів, а й в їхніх окремих складових частинах, створенні пристроїв високоефективної звукоізоляції для вживання у різних галузях промисловості. Авторські винахідницькі розробки знайшли застосування в:

- конструкції стінок оболонки пристроїв аускультативної діагностики [164, 165, 167]- для вживання в галузі медичного обладнання;
- конструкції стінок оболонки пристроїв пристрою спрямованого прийому звукової енергії [169, 170]- для застосування в галузі акустoeлектроніки та приладобудування;
- конструкції звукоізолюючої панелі з максимально можливою звукоізолюючою здібністю [130]- для вживання в спеціальних випадках;

Винайдено та подалі вдосконалено пристрої вузькоспрямованого (орієнтованого) випромінювання звукових хвиль, а саме – головний телефон Абракітова [156].

Кожний з розроблених автором вищевказаних пристроїв являє собою повністю завершену та працездатну конструкцію і може вживатися до своєї мети.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Конституція України: офіц. текст: [прийнята на п'ятій сесії Верховної Ради України 28 червня 1996 р. із змінами, внесеними Законом України від 8 грудня 2004 р.: станом на 1 січня 2006 р.]. – К.: Мін-во Юстиції України, 2006. – 124 с.

2. Закон України "Про охорону праці". Законодавство України про охорону праці. Збірник нормативних документів в 4-ох томах. К., 1995. – т. 1.

3. Закон України "Про забезпечення санітарного та епідемічного благополуччя населення".

4. Вся база «Законодавство України». (Добірка діючих законодавчих документів в електронному вигляді). [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://zakon.rada.gov.ua/cgi-bin/laws/main.cgi> .

5. Державний комітет України з нагляду за охороною праці. (Офіційний сайт). [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.dnop.kiev.ua/>.

6. Реєстр ДНАОП. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.document.org.ua/docs/dnaop18.php>.

7. ГОСТ 12.0.003-74\*. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.

8. Охорона праці в Україні. Нормативна база. (3-є вид., змін. і доп.) / Роїна О.М. - К.: КНТ, 2007. - 548 с.

9. НАУ - Нормативні акти України. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.nau.kiev.ua/index.php>.

10. «Зодчий». Законы, постановления, указы, соглашения, документы министерств и ведомств (ЗАК) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://aist.com.ua/products/zodchiy/base/zak/> .

11. ДСТУ 2325-93. Шум. Терміни та визначення.

12. ДСТУ 2867-94. Шум. Методи оцінювання виробничого шумонавантаження. Загальні вимоги.

13. ГОСТ 12.1.003-83\*.ССБГ. Шум. Общие требования безопасности.

14. ГОСТ 12.1.005-88\*. ССБГ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны.

15. ГОСТ 12.1.029-80. Средства и методы защиты от шума. Классификация.

16. ГОСТ 12.1.036-81. Шум. Допустимые уровни в жилых и общественных зданиях.

17. ДСН 3.3.6.037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвук та інфразвук. К.: 1999.

18. СНиП II -12-77. Защита от шума. Нормы проектирования.

19. Самойлюк Е.П. Качество жизни и градостроительство. / Е.П. Самойлюк, В.В. Гилёв, М.Ю. Трошин. / Строительство, материаловедение, машиностроение. // Сб. научн. трудов. Вып. 38. - Дн-ск, ПГАСА, 2006. - С. 119-124.

20. Производственный шум. / С.В. Алексеев, М.А. Хаймович Е.Н., Кадыскина, Г.А. Суворов. – Л.: Медицина, 1991. – 185 с.

21. Janousek M. Sledovanie vestiburaneho aparatu v risiku hluku a ultrazvuku / M. Janousek, I. Gruberova, D. Sviter // Pr. Lec., 1985. - Vol. 37.- P. 369-374.

22. Lober A. Lärm-Belastung in der Arbeitswelt and Umwelt. // Zbl. Bacteriol., 1984. - Bd 179.- S. 1-33.

23. Mantysalo S. Effects of impulse noise and continuous Stlady state noise oh hearing / S. Mantysalo, I. Viori // Brit. I. Industr. Med., 1984. - Vol. 41. - P. 122-132.

24. Шум и шумовая болезнь. / Е.П. Андреева-Галанина, С.В. Алексеев, А.В. Кадыскин, Г.А. Суворов. – Л., 1972. – 135 с.

25. Трахтенберг І.М. Гігієна праці та виробнича санітарія: Навчальний посібник/ І.М.Трахтенберг, М.М.Коршун, О.В. Чебанова; За ред. І.М.Трахтенберга.- К., 1997.- 464 с.

26. Малая медицинская энциклопедия: в 6-ти томах / Гл. ред. В.И. Покровский. М.: Изд-во Большая советская энциклопедия, 1992. – тома 1 – 6.

27. Antony A., Ankerman E. Effects of noise on the blood eosinophil levels and adrenals of mice. // J. Acoust. Soc. Amer. - 1955. - P. - 1144-1149.

28. Суворов Г. А. Гигиеническое нормирование производственных шумов и вибраций / Г. А. Суворов, Л. Н. Шкаринов, Э. И. Денисов. - М. : Медицина, 1984. - 240 с.

29. Суворов Г.А. Теоретические основы гигиенического нормирования шума. - / Г.А. Суворов, Л.Н. Шкаринов, Э.И. Денисов, В.Г. Овакимов // Вестник АМН СССР, 1981. - С. 62-66.

30. Абракітов В.Е. Моніторинг шумового забруднення сучасних міст. // Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції «Сучасний соціокультурний простір». 20-25.12.2004, Київ, 2004. – ч. 1. – 1 с.

31. Богданов Ю.В. Строительная площадка - активный источник городского шума / Ю.В. Богданов, О.И. Прохватило. // Строительство, материаловедение, машиностроение. Сб. научн. трудов. - Вып. 38. -Днепропетровск: ПГАСА, 2006. - С. 161 -165.

32. Абракітов В. Безпека праці і її вплив на фінансово-економічну діяльність промисловості України / В. Абракітов, І. Карпалюк // Україна: аспекти праці. Науковий економічний та суспільно-політичний журнал. К.: Праця, 1996.- № 4. - с. 48 - 49.

33. Абракітов В.Э. Система эргономической оценки реконструируемых территорий городов по критерию их акустического комфорта / В.Э. Абракітов // Новое в экологии и безопасности жизнедеятельности. Международный экологический конгресс. Санкт-Петербург 14-16 июня 2000 г. – т. 2. – с. 252.

34. Карпов Ю.В. Защита от шума и вибрации на предприятиях химической промышленности. / Ю.В.Карпов, Л.А. Дворянцева. - М.: Химия, 1991. – 120 с.

35. Поспелов П.И. Борьба с шумом на автомобильных дорогах. / П.И. Поспелов. – М.: Транспорт, 1981. – 88 с.

36. Абракітов В.Е. Актуальність проблеми боротьби із шумом, і створення засобів акустичного моделювання, як один із способів рішення даної проблеми / В.Е. Абракітов // Коммунальное хозяйство городов: Научно-технический сборник. Вып. №. 63. К.: Техніка, 2005. – С. 316 -320.

37. Борьба с шумом на производстве: Справочник / Е.Я. Юдин, Л.А. Борисов, И.В. Горенштейн и др.; Под общ. ред. Е.Я. Юдина. – М.: Машиностроение, 1985. – 400 с.

38. Справочник по защите от шума и вибрации жилых и общественных зданий / В.И. Заборов, М.И. Могилевский, В.Н. Мякшин, Е.П. Самойлюк; Под ред. В.И. Заборова. – К.: Будивельник, 1989. – с. 85.

39. Градостроительные меры борьбы с шумом / Г.Л. Осипов и др. – М.: Стройиздат, 1975. – 215 с.

40. Елизаров Ю.М. Снижение шума и вибрации при формировании сборного железобетона. / Ю.М. Елизаров. - М.: Стройиздат, 1970. – 175 с.

41. Маслов Н.В. Градостроительная экология / Н.В.Маслов; Под ред.: М.С. Шумилов. – М.: Высшая школа, 2002. - 284 с.

42. Осипов Г.Л. Защита от шума в градостроительстве / Г.Л. Осипов, В.Е. Коробков, А.Л. Климухин. Под ред. Осипова Г.Л. - М.: Стройиздат, 1993. - 95 с.

43. Осипов Г.Л. Снижение шума в зданиях и жилых районах / Г.Л. Осипов, Е.Я. Юдин, Т. Хюбнер. – Под ред. Осипова Г.Л. - М.: Стройиздат, 1987. - 96 с.

44. Самойлюк Е.П. Борьба с шумом в градостроительстве. / Е.П. Самойлюк. – К.: Будівельник, 1975. – 126 с.

45. Самойлюк Е.П. Борьба с шумом в населенных местах. / Е.П. Самойлюк, В.И. Денисенко, А.П. Пилипенко. – К.: Будівельник, 1981. – 144 с.

46. Абракитов В.Э. Эргономическая оценка реконструируемых территорий городов по критерию их акустического комфорта / В.Э. Абракитов // Тезисы докладов XXX научно-технической конференции преподавателей, аспирантов и сотрудников ХГАГХ. Харьков, 2000. - С.75.

47. Мякшин В. Н. Борьба с шумом и вибрацией на предприятиях пищевой промышленности./ В. Н. Мякшин. - К.: Техніка, 1985. - 142 с.

48. Самойлюк Е.П. Борьба с шумом и вибрацией в промышленности: Монография. / Е.П. Самойлюк, В.В. Сафонов. - К.: Выща школа, 1990. - 167 с.

49. Самойлюк Е.П. Борьба с шумом и вибрацией в строительстве и на предприятиях строительной индустрии. / Е.П. Самойлюк, В.В. Сафонов. – К., 1979. - 152 с.

50. Справочник по контролю промышленных шумов/ Пер. с англ.: Л.Б. Скариной, Н.И. Шабановой; Под ред. В.В. Ключева.- М.: Машиностроение, 1979. - 447 с.

51. Дідковський В.С. Шум і вібрація: Підручник для студ. технічних вузів/ В.С.Дідковський, П.О.Маркелов.- К.: Вища школа, 1995. - 263с.

52. Кухар Д.П. Боротьба з шумом на комунально-побутових підприємствах/ Д.П. Кухар, О.С. Сегал.- К.: Будівельник, 1976. - 80с.

53. Вибрация и шум в текстильной и легкой промышленности (измерения, характеристики и методы борьбы) / Под ред. Я.И. Коритыцкого.- М.: Легкая индустрия, 1974. - 328 с.

54. Лагунов Л. Ф. Борьба с шумом в машиностроении / Л. Ф. Лагунов, Г. Л. Осипов. - М.: Машиностроение, 1980. - 150 с.

55. Пітельгузов М.А. Засоби захисту від шуму та вібрації в машинобудуванні/ М.А.Пітельгузов; Східноукр. нац. ун-т ім. В.Даля. - Луганськ: СНУ, 2003. - 155 с.

56. Новак С.М. Защита от вибрации и шума в строительстве. / С.М. Новак, А.С. Логвинец. – К.: Будивэльник, 1990. – с. 32.

57. Абракизов В.Э. Натурные исследования шума г. Харькова. / В.Э. Абракизов. - Х.: Парус, 2008. – 68 с.

58. Абракітов В.Е. Вдосконалення методів і засобів боротьби з шумом, випромінювання звуку та моделювання процесів його розповсюдження / В.Е. Абракітов // Тези доповідей науково-методичної конференції "Безпека життєдіяльності". Харків, 2001. С. – 62-63.

59. Абракизов В.Э. О вкладе фонового шума в общую картину шумового загрязнения окружающей среды (на базе данных непосредственных натурных измерений, проведенных лично автором). / В.Э. Абракизов // Науковий вісник будівництва. Вип. № 53. Х.: ХДТУБА ХОТВ АБУ, 2009. - С. 263-266.

60. Абракизов В.Э. Натурные измерения уличного шума (с учетом фонового вклада метеорологических явлений в суммарный звуковой спектр) / В.Э. Абракизов // Коммунальное хозяйство городов. Вип. № 88. К. – Техніка, 2009. - С. 364-370.

61. Абракітов В.Е. Експериментальні дослідження шуму ліфтово-сходових вузлів багатоповерхових житлових будівель / В.Е. Абракітов, О.Ю. Нікітченко, І.О. Фаріна // Науковий вісник будівництва. Вип. 57. Х.: ХДТУБА, ХОТВ АБУ, 2010. - С. 293-297.

62. Тэйлор Р. Шум. / Р. Тэйлор. Пер. с англ. Д. И. Арнольда. Под ред. М. А. Исаковича. - М.: Мир, 1978. - 308 с.

63. Сафонов В.В. Уменьшение шума на реконструируемых территориях / В.В. Сафонов, Ю.В. Богданов, В.Э. Абракизов, Л.М. Диденко, В.В. Мелашич // Строительство, материаловедение, машиностроение. Сб. научн. трудов. Вип. 38. Днепрпетровск, ПГАСА, 2006. - С. 260-267.

64. Сафонов В.В. Шум реконструкции зданий и сооружений, проблемы его снижения на прилегающих территориях / В.В. Сафонов, Ю.В. Богданов, В.Э. Абракизов,



В.В. Мелашич, Л.М. Диденко, Э.Е. Стрежекуров // Материалы научно-технического семинара «Актуальные проблемы акустической экологии и защиты от шума». Севастополь, 2006. – С. 121 – 130.

65. Абракітов В.Е. Утилізація звукової енергії – новий напрямок в науці і техніці. /В.Е. Абракітов. – Х., Парус, 2007. - 80 с.

66. Абракитов В.Э. Шум систем кондиционирования в зданиях как одна из наиболее актуальных проблем современной урбанизации / В.Э. Абракитов, Е.А. Помыткина // Коммунальное хозяйство городов. Вип. 84. К. Техніка, 2008. - С. 410-414.

67. Абракитов В.Э. Шум в салоне трамвая "Tatra T-3". / В.Э. Абракитов. // Materiály V mezinárodní vědecko - praktická konference "Aplikované vědecké novinky - 2009". Díl 7. Ekologie. Zeměpis a geologie. Zemědělství. Zvěrolékařství: Praha. Publishing House "Education and Science" s.r.o.- 3-5 stran.

68. Abrakítov V.E. Noise in a tram KTM-19KT. / Vladimír E. Abrakítov; Oleg V. Ustimenko. // Materiály VI Mezinárodní vědecko-praktická conference "Dny vědy-2010" 27.03.10-05.04.10. Praha: publishing House "Education and Science" S.r.o., 2010. – p.45-47.

69. Абракитов В.Э. Исследование шумов лифтового узла в зданиях различных типов (на базе непосредственных натурных измерений, проведенных авторами). / В.Э. Абракитов, И.А. Фарина // Тезисы докладов XXXV научно-технической конференции преподавателей, аспирантов и сотрудников Харьковской нац. академии городского хозяйства. Х.: ХНАГХ, 2010. - С. 202- 203.

70. Абракитов В.Э. Спектры шума в жилой застройке г. Харькова (по данным собственных натурных измерений, осуществлённых авторами) / В.Э. Абракитов, О.Ю. Никитченко // Науковий вісник будівництва. Вип. 49. Х.: ХДТУБА ХОТВ АБУ, 2008. - С. - 330-337.

71. Абракизов В.Э. Экспериментальная проверка научной гипотезы о спаде интенсивности шумового излучения на расстоянии пропорционально отношению площадей волновых фронтов. / В.Э. Абракизов // Науковий вісник будівництва. Вип. 54. - Х.:ХДТУБА ХОТВ АБУ, 2009. - С. 326-332.

72. Абракизов В.Э. Методологическая основа составления карты шума г. Харькова. / В.Э. Абракизов // Науковий вісник будівництва. Вип. № 55. Х.: ХДТУБА ХОТВ АБУ, 2009. - С. 279 - 284.

73. Абракизов В.Э. Экспериментальные исследования шумового режима в г. Одессе. / В.Э. Абракизов. // Materiały V Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji «Nauka: teoria i praktyka - 2009». V. 5. Przemysł. Nauka i studia, 2009. - str. 77-79.

74. Абракизов В.Э. Исследования шумового режима в с. Первомайское Змиевского района Харьковской области / В.Э. Абракизов. // Матеріали за V міжнародна научна практична конференція "Новини от научния напредък-2009". 17-25.08.2009. София: "Бял ГРАД-БГ" ООД, 2009. - С. 60-65.

75. Абракизов В.Э. Натурные измерения шумового режима в г. Черкассы. / В.Э. Абракизов. // Тезисы докладов XXXV научно-технич. конференции преподавателей, аспирантов и сотрудников Харьковской национальной академии городского хозяйства. Х.: ХНАГХ, 2010. - С. 209- 210.

76. Абракизов В.Э. Карта шума Салтовского жилого массива г. Харькова, 2011 г. / В.Э. Абракизов. // Матеріали міжнародної науково-практич. конф. "Безпека життєдіяльності в навколишньому і виробничому середовищах". Х.: ХНАМГ, 2011. - С. 114-115.

77. Абракизов В.Э. Новые средства борьбы с шумом / В.Э. Абракизов. // Новое в экологии и безопасности жизнедеятельности Международный экологический конгресс. Санкт-Петербург 16-18 июня 1999 г. - т.3. – с. 186.

78. Рабинович М.И. Введение в теорию колебаний и волн. М.И. Рабинович, Д.И. Трубецков / – М.: Наука, 1984. – 432 с.

79. Физический энциклопедический словарь. - М.: Сов. энцикл., 1987. - 944 с.

80. Справочник по технической акустике / Под ред. Хекла М. И Мюллера Х.А. Пер. с нем. Л.: Судостроение, 1980. – 440 с.

81. Справочник по технической акустике / Х. Г. Дистель, К. Гайке, Р. Герлих и др.; Перевод с нем. Б. Д. Виноградова, Н. М. Колоярцева Л. : Судостроение, 1980 . - 438 с.

82. Подольный Р.Г. Нечто по имени Ничто / Р.Г. Подольный. – М.: Знание, 1983. – с. 34.

83. Крикунов Г.Н. Безопасность жизнедеятельности. Ч. 1, 2. – Г.Н. Крикунов, А.С. Беликов, В.Ф. Залунин/ - Днепропетровск: Пороги, 1992. - 412 с.

84. В.Э. Абракітов. Почему зайцы не зелёные? [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://discovery.h11.ru/Abrakitov/WHY\\_ZAYCY\\_NOT\\_GREEN.htm](http://discovery.h11.ru/Abrakitov/WHY_ZAYCY_NOT_GREEN.htm).

85. Абракітов В.Е. На шляху до наукових відкриттів: монографія. / В.Е. Абракітов. - Х.: Парус, 2007. – 424 с. - ISBN 966-695-085-5.

86. Абракітов В.Е. Каустики хвильових фронтів, і їхні метаморфози. / В.Е. Абракітов. // Строительство, материаловедение, машиностроение / Сб. научн. трудов. Вып. 28. – Дн-ск, ПГАСиА, 2004. – с. 237-241.

87. К. А. Наугольных. Волновое сопротивление (в акустике). [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cultinfo.ru/fulltext/1/001/008/006/292.htm> .

88. Акустическая энциклопедия. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.acoustic.ru/Article\\_28.html](http://www.acoustic.ru/Article_28.html).

89. Шумомер. Акустическая энциклопедия. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.acoustic.ru/Article\\_43.html](http://www.acoustic.ru/Article_43.html).

90. Абракітов В.Е. Тринадцятирічний досвід розрахунку часу реверберації в приміщеннях за методикою Абракітова / В.Е. Абракітов. // Збірник матеріалів IV міжрегіональної науково-практичної конференції "Психологічні та технічні

аспекти безпеки праці, життя та здоров'я людини". 15 травня 2007 року. Полтава, 2007. - С. 5 - 7.

91. Абракітов В.Е. Розрахунок часу реверберації звуку за методикою Абракітова / В.Е. Абракітов, Б.М. Коржик / Харківський інститут інженерів міського господарства. - Харків, 1994.- 10 с. - Деп. в ДНТБ України 25.11.1994 №2242-Ук94.

92. Блинова Л.П.. Акустические измерения. / Л.П. Блинова, А.Е. Колесников, Л.Б. Ланганс – М.: Изд-во стандартов, 1971. – 272 с.

93. Осипов Г.Л. Акустические измерения в строительстве. / Г.Л. Осипов, Д.З Лопашев., Е.Н. Федосеева. – М.: Стройиздат, 1978. – 212 с.

94. Брюль и Кьер. Электронная аппаратура. Каталог 1989/90 р. Печать: К.Ларсен и сын А/О, ДК-2600, Глоstrup, Дания. – Рус. - Описание моделей 7005, 7006, 7007.

95. Державні нормативні акти з охорони праці. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://dnop.com.ua>.

96. СНиП 23-03-2003. Защита от шума. М.: Госстрой России, 2004.

97. ДСН 3.3.6.037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. К. - 1999. - 32 с.

98. Советский энциклопедический словарь / Гл. ред. Прохоров А. М. – 4-е изд. М.: Сов. Энциклопедия, 1989. – 1632 с.

99. Кухлинг Х. Справочник по физике: Пер. с нем. / Х. Кухлинг. – М.: Мир, 1985. – 520 с.

100. Кухлинг Х. Справочник по физике: Пер. с нем. М.: Мир, 1985 [Електронний ресурс]. – Режим доступа: <http://www.mexanik.ru/136/ann136.htm>.

101. Кузьмичев В.Е. Законы и формулы физики. / В.Е. Кузьмичев. – К.: Наукова думка, 1989. – 864 с.

102. Решение о выдаче патента по заявке № 94032106/03 (031463) (Россия). Способ ослабления интенсивности звуковых

волн / Абракитов В.Э., Карпалюк И.Т. - МПК<sup>6</sup> Е 04 В 1/82, Е 04 В 1/74. - Оpubл. 27.05.96. М.: Изобретения (Заявки и патенты): Официальный бюллетень, 1996.- № 15. - С. 110.

103. Абракитов В.Э. Новый способ борьбы с распространением структурного шума в строительных конструкциях / В.Э. Абракитов // Науковий вісник будівництва. Вип. № 18. Харків: ХДТУБА ХОТВ АБУ, 2002. – с. 204-206.

104. Политехнический словарь / Под ред. Артаболевского И.И. М.: Сов. энциклопедия, 1977. – 608 с.

105. Майер В.В. Полное отражение света в простых опытах. / В.В. Майер. – М.: Наука, 1986.- 128 с.

106. Эйхенвальд А.А. Избранные работы / А.А. Эйхенвальд. – М.: Гостехиздат, 1956.- с. 121-146.

107. Захаров М.И. Получение и исследование поляризованного света. / М.И. Захаров, М. Ф. Ступак. – Новосибирск, 2002. – 17 с.

108. Захаров М.И., Ступак М. Ф. Получение и исследование поляризованного света. Новосибирск, 2002. – 17 с. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: [http://phys.nsu.ru/optics/text/Labwork\(optics\)3-1.pdf](http://phys.nsu.ru/optics/text/Labwork(optics)3-1.pdf).

109 Трофимова Т.И. Курс физики. Колебания и волны. Учебное пособие. / Т.И. Трофимова. – М.: Академия, 2003. - С. 284-291.

110. Коржик Б.М. Поляризация звуковых волн в строительных конструкциях и материалах / Б.М. Коржик, В.Э. Абракитов, И.Т. Карпалюк // Повышение эффективности и надежности систем городского хозяйства: Сб. научных трудов. К.: ИСДО, 1994.- с. 132 - 135.

111. В.Э. Абракитов. Поляризация звука – один из наиболее перспективных путей борьбы с распространением структурного шума в строительных конструкциях. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://discovery.h11.ru/Abrakitov/Polarization\\_of\\_the\\_sound.htm](http://discovery.h11.ru/Abrakitov/Polarization_of_the_sound.htm).

112. Абраки́тов В.Э. Аналоговое моделирование при решении задач борьбы с шумом. Дисс.... канд. техн. наук / В.Э. Абраки́тов. – Днепропетровск, 1995.- 157 с.

113. Абраки́тов В.Э. Аналоговое и квазианалоговое моделирование процессов распространения звука в пространстве для прогнозирования шумового режима на защищаемом объекте. / В.Э. Абраки́тов. – Харьков: АО ХГПИ, 1997. – 40 с.

114. Абраки́тов В.Э. Аналогия волновых явлений звукового и оптического излучений / В.Э. Абраки́тов, Б.М. Коржик // Коммунальное хозяйство городов: Республик. межведомственный сборник. Вып. № 4. К.: Техніка, 1995. – С. 36-37.

115. Абракі́тов В.Е. Аналогія хвильових характеристик звукового та оптичного випромінювання / В.Е. Абракі́тов, В.В. Сафонов // Інтенсифікація будівництва: Зб. наук. праць. К.: ІСДО, 1994.- с. 15-20.

116. Абраки́тов В.Э. Глобальная научная теория, объясняющая процессы снижения шума при переходе звуковой волной границы раздела сред. / В.Э. Абраки́тов, И.Т. Карпалюк // Коммунальное хозяйство городов: Научно-технический сборник. Вып. №. 64. К.: Техніка, 2005. – С. 63-70.

117. Абраки́тов В.Э., Карпалюк И.Т. Глобальная научная теория, объясняющая процессы снижения шума при переходе звуковой волной границы раздела сред. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://discovery.h11.ru/Abrakitov/theory.mht>

118. Абраки́тов В.Э. Глобальная научная теория снижения шума при пересечении звуковой волной границы раздела сред. / В.Э. Абраки́тов // Тези доповідей науково-методичної конференції "Безпека життєдіяльності". Харків, 2005. - С. 123 - 124.

119. Справочник по судовой акустике, под ред. Клюкина И.И. и Боголепова И.И. Л.: Судостроение, 1978 с. 315-323.

120. Абракі́тов В.Е. Конструювання шумозахисних вікон для захисту квартир та інших приміщень від акустичного

дискомфорт / В.Е. Абракітов // Науковий вісник будівництва. Вип. 31. Харків: ХДТУБА ХОТВ АБУ, 2005. - с. 210-214.

121. Абракітов В.Э.. Влияние микроструктуры пористых материалов на их звукопоглощающие свойства / В.Э. Абракітов, К.В. Данова // Коммунальное хозяйство городов: Научно-технический сборник. Вып. № 42. К.: Техніка, 2002. - с. 190-194.

122. Абракітов В.Э. Многослойная звукопоглощающая панель / В.Э. Абракітов, В.А. Русова // Коммунальное хозяйство городов: Научно-технический сборник. Вып. № 58. К.: Техніка, 2004. – с. 239 – 243.

123. Абракітов В.Э. Поляризация звука – один из наиболее перспективных путей борьбы с распространением структурного шума в строительных конструкциях / В.Э. Абракітов // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Збірник наукових праць. Вип.. № 8. Рівне: Видавництво Рівненського державного технічного університету, 2002. – с. 189 – 196.

124. Пат. отд.: № публ. пат. 94032106. Способ ослабления интенсивности звуковых волн. [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

<http://sibpatent.ru/patent.asp?nPubl=94032106&sort=2&f1sob=%u0410%u0431%u0440%u0430%u043A%u0438%u0442%u043E%u0432>.

125. Абракітов В.Е. Експериментальні дослідження тришарової панелі із м'яким середнім шаром / В.Е. Абракітов // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. Випуск № 3. Одеса: ВМК «Місто майстрів», 2001 р. – с. -161-166.

126. Абракітов В.Е. Алгоритм розрахунку конструктивних параметрів багатошарових звукоізолюючих панелей типу «сандвіч» з використанням явища поляризації звуку/ В.Е. Абракітов // Науковий вісник будівництва. Вип. № 19. Харків: ХДТУБА ХОТВ АБУ, 2002. – с. 113-117.

127. Абракітов В.Е. Програма для обчислення конструктивних параметрів багатошарових звукоізолюючих панелей типу «сандвіч» з використанням явища поляризації звуку/ В.Е. Абракітов // Науковий вісник будівництва. Вип. №. 29. Харків: ХДТУБА ХОТВ АБУ, 2004. – с 226-230.

128. Патент № 9518А (Україна). Спосіб оперативного регулювання часу реверберації звуку в приміщеннях (варіанти) / Абракітова Л.О., Абракітов В.Е. - МПК<sup>6</sup> G10K 15/08. Опубл. 30.09.96. Бюл. № 3.

129. Авторское свидетельство СССР N 1516585, кл. Е 04 В 1/82, 5/52.

130. Патент № 2083775 (Россия). Звукоизолирующая панель с максимально возможной звукоизолирующей способностью / Абракітов В.Э. - МПК<sup>6</sup> E04В 1/82. Опубл. 10.07.97. М.: Изобретения (Заявки и патенты): Официальный бюллетень, 1997, № 19.

131. Патент № 2084968 (Россия). Шумоизолирующий коффердам судна / Абракітов В.Э., Абракітова Л.А. - МПК<sup>6</sup> G 10 К 11/00. Опубл. 20.07.97. М.: Изобретения (Заявки и патенты): Официальный бюллетень, 1997, № 20.

132. Абракітов В.Э., Карпалюк И.Т. Звукоизолирующий элемент. Информационный листок ИЛ №75-95.Харьков: ХОРПНТЕІ, 1995.

133. Абракітов В.Е. Хитрощі звукоізолюючої панелі із максимально можливою звукоізолюючою здатністю... / В.Е. Абракітов // Строительство, материаловедение, машиностроение. Сб. научн. трудов. Вип. 40. - Дн-ск: ПГАСА, 2007. - С. 126-132.

134. Юферов А.П. Повышение звукоизоляции двухстенных конструкций в зданиях. Дисс....канд. техн. наук. - Нижний Новгород, 1997. - 136 с.

135. Beranek L. Sound Transmission through Multiple Structures Containing Flexible Blankets / L. Beranek, G. Work// J.Acoust. Soc.Amer. - 1949. - 21. - P. 419.



136. Кочкин А.А. Процесс самосогласования волнового поля воздушного промежутка / А.А. Кочкин. // Материалы научно-технического семинара «Актуальные проблемы акустической экологии и защиты от шума». Севастополь, 2006. – С. 41 – 44.

137. Абракітов В.Э. Аналогове та квазіаналогове моделювання процесів розповсюдження звуку в просторі для прогнозування шумового режиму на об'єкті, що захищається. Друге видання, перероблене та доповнене. /В.Е. Абракітов. – Х.: Парус, 2007. – 108 с.

138. Борьба с шумом методами звукоизоляции / Заборов В.И., Клячко Л.Н., Росин Г.С. М.: Стройиздат, 1964. – 122 с.

139. Борисов Л.П. Звукоизоляция в машиностроении / Л.П. Борисов, Д.Р. Гужас. – М.: Машиностроение, 1990. – 256 с.

140. Осипов Л.Г. Звукоизоляция и звукопоглощение: [Учеб. пособие для вузов "Пром. и гражд. стр-во" и "Теплоснабжение и вентиляция"/Л.Г. Осипов, В.Н. Бобылев, Л.А. Борисов и др.]; Под ред.: Г.Л. Осипов, В.Н. Бобылев. М. :АСТ, 2004. - 450 с.

141. Пітельгузов М.А. Засоби захисту від шуму та вібрації в машинобудуванні/ М.А.Пітельгузов; Східноукр. нац. ун-т ім. В.Даля. Луганськ :СНУ, 2003. - 155 с.

142. Порядков В.И. Проектирование мал шумных механизмов / В.И. Порядков. – М.: Машиностроение, 1991. – 64 с.

143. Снижение шума в зданиях и жилых районах / Под ред. Осипова Г.Л. и Юдина Е.Я. М.: Стройиздат, 1987. – 558 с.

144. Абракітов В.Э. Микроструктура пористых материалов и их звукопоглощающая способность // Тезисы докладов XXVII научно-технической конференции преподавателей, аспирантов и сотрудников ХИИГХ. Харьков: ХИИГХ, 1994. - с. 59 - 60.

145. Абракітов В.Э., Данова К.В. Влияние микроструктуры пористых материалов на их звукопоглощающие свойства. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://discovery.h11.ru/Abrakitov/INFLUENCE\\_MIKROSTRUKTUR\\_Y\\_PORISTYH\\_MATERIAL.htm](http://discovery.h11.ru/Abrakitov/INFLUENCE_MIKROSTRUKTUR_Y_PORISTYH_MATERIAL.htm).

146. Компанеец А.С. Законы статистической физики. Ударные волны. Сверхплотное вещество. М.: Наука, 1976. – 286 с.

147. Снижение шума на промышленных предприятиях / Ленинградский государственный проектный институт. М.: Стройиздат, 1971. – 168 с.

148. Безпека життєдіяльності, екологія та охорона праці: Енциклопедичний словник./ Абракітов. В.Е. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.abrakitov.narod.ru> .

149. Сайт научных открытий и изобретений. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.discovery.h11.ru> .

150. <http://discovery.h11.ru/Abrakitov/rekonstr.htm> Абракітов В.Е. Шумозахисні вікна як один з заходів захисту квартир та інших приміщень від акустичного дискомфорту. (Публ. в Інтернет).

151 Абракітов В.Э., Русова В.А. Многослойная звукопоглощающая панель. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://discovery.h11.ru/Abrakitov/Laminated\\_anti-sound\\_panel.htm](http://discovery.h11.ru/Abrakitov/Laminated_anti-sound_panel.htm) .

152. Заявка на открытие № ОТ ОВ 56 (Россия). Зависимость коэффициентов звукопоглощения и отражения звука от характеристик среды распространения падающей и пропущенной звуковой волны / Абракітов В.Э. – Заявл. 25.05.94.

153. Абракітов В.Э., Данова К.В. (2002) Влияние микроструктуры пористых материалов на их звукопоглощающие свойства. Коммунальное хозяйство городов (42). рр. 190-194. [Електронний ресурс]: <http://eprints.ksame.kharkov.ua/3741/>. Заголовок з екрану.

154. Абракітов В.Э., Русова В.А. Многослойная шумопоглощающая панель - Цифровий репозиторій Харківської національної академії міського господарства (ХНАМГ). [Електронний ресурс]: <http://eprints.ksame.kharkov.ua/2358/>. Заголовок з екрану.

155. Сафонов В.В. Моделивання акустичних процесів методом аналогії / В.В. Сафонов, В.Е. Абракітов, Ю.В. Богданов // Строительство, материаловедение, машиностроение. / Сб. научн. трудов. Вып. 38. Днепропетровск, ПГАСА, 2006. - С. 124 - 133.

156. Патент № 2078483 (Россия). Головной телефон Абракітова / Абракітова Л.А., Абракітов В.Э. - МПК<sup>6</sup> H04R 1/10; Оpubл. 27.04.97, Бюл. № 12.

157. Скляр В.Е. Стерефонические головные телефоны и их применение. / В.Е. Скляр. – М.: Энергия, 1977. – с. 13 – 17.

158. ГОСТ 12.4.051-78 ССБТ. Средства индивидуальной защиты органов слуха. Общие технические требования и методы испытаний.

159. Суворов Н.С. Современные боевые корабли. / Н.С. Суворов, В.Д. Иванов, В.П. Федоров. – М.: Из-во ДОСААФ СССР, 1978. - С. 110.

160. Авторское свидетельство СССР N 830519, кл. G 10 K 11/00, 1981.

161. Заявка на пат. N В3А 06560 (Україна). Шумоізолюючий коффердам. / Абракітов В.Е., Абракітова Л. О. - Заявл. 20.10.93.

162. В.Э. Абракітов: Шумоізолюючий коффердам. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://discovery.h11.ru/Abrakitov/Invention 2084968.htm>.

163. Пат. отд.: № публ. пат. 2084968. Шумоізолюючий коффердам судна. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://sibpatent.ru/patent.asp?nPubl=2084968&sort=2&fIsob=%u0410%u0431%u0440%u0430%u043A%u0438%u0442%u043E%u0432>.

164. Патент № 2063703 (Россия). Стерефонендоскоп / Абракітов В.Э., Абракітова Л.А. - МПК<sup>6</sup> A61B 7/00. Оpubл. 20.07.96. Бюл. № 20.

165. Рішення про видачу патенту по заявці № 94031902 (Україна) від 22.07.96. Стерефонендоскоп / Абракітова Л.О., Абракітов В.Е. - МПК<sup>6</sup> A61B 7/00.

166. Авторское свидетельство СССР N 1814880, кл. А 61В 7/00, опубл.. 1993, Бюл. 18.

167. Абракитов В.Э. Устройство аускультативной диагностики. Информационный листок ИЛ №78-95. Харьков: ХОРПНТЕІ, 1995.

168. Пат. отд.: № публ. пат. 2063703. Стереофонендоскоп. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://sibpatent.ru/patent.asp?nPubl=2063703&sort=2&fIsob=%u0410%u0431%u0440%u0430%u043A%u0438%u0442%u043E%u0432>

169. Патент № 10549А (Україна). Пристрій вибірного прийому звукових хвиль Абракітова В.Е. / Абракітов В.Е. - МПК6 G10K 11/00, H04R 29/00. Опубл. 25.12.96. Бюл. № 4.

170. Заявка на патент № 94014934/28 (Россия). Устройство избирательного приема звуковой энергии Абракитова В.Э./ Абракитов В.Э.- МПК<sup>6</sup> Н 04 R 29/00; Опубл. 10.12.95. М.: Изобретения (Заявки и патенты): Официальный бюллетень, 1995, № 34.- с.-114.

171. Авторское свидетельство СССР № 775741, кл. G 10 K 11/00, H 04 R 29/00, 1980.

172. Рішення про видачу патенту по заявці № 94051488 (Україна) від 26.06.96. Звукоізолююча панель / Абракітов В.Е., Коржик Б.М., Серіков Я.О. - МПК<sup>5</sup> E04B 1/82. Опубл. 29.12.94. К.: Промислова власність: Офіційний бюлетень, 1994.- № 8.

173. Пановко Я.Г. Устойчивость и колебания упругих систем. / Я.Г. Пановко, И.И. Губанова. – М.: Наука, 1979. – 384 с.

174. Авторское свидетельство СССР N 1270251, кл. Е 04 В 1/82, 1986.

175. Заявка на пат. N В42 00682 (Україна). Звукоізолююча панель з максимально можливою звукоізолюючою здібністю. / Абракітов В.Е. - Заявл. 25.02.94.

176. Пат. отд.: № публ. пат. 2083775. Звукоизолирующая панель с максимально возможной звукоизолирующей способностью. [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

<http://sibpatent.ru/patent.asp?nPubl=2083775&sort=2&fIsob=%u0410%u0431%u0440%u0430%u043A%u0438%u0442%u043E%u0432> .

177. Мезенцев В. Чудеса. Популярная энциклопедия / В. Мезенцев. – Алма-Ата: Главная редакция казахской советской энциклопедии, 1990. - С. 8 – 10. - Т. 2.

178. Заявка на пат. N В43 00812 (Україна). Пристрій контролю та вимірювання звукоізолюючої здібності шумозахисних засобів. / Абракітов В.Е., Абракітова Л. О. - Заявл. 21.04.94.

179. Боголепов И.И. Магнитная подвеска в звукоизолирующих кабинах для конфиденциальных переговоров / И.И. Боголепов, Чэнь Сятин // Инженерно-строительный журнал. – № 4, 2010. – С. 33 – 37.

180. Абракітов В.Е. Оперативне регулювання часу реверберації звуку в приміщеннях / В.Е. Абракітов // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Збірник наукових праць. Вип.. № 7. Рівне: Видавництво Рівненського державного технічного університету, 2001. – с. 279 - 285.

*Наукове видання*

**АБРАКІТОВ Володимир Едуардович**

**ПРОПОЗИЦІЇ ДО КОНСТРУЮВАННЯ ЗАСОБІВ  
БОРотьБИ З ШУМОМ**

Монографія

За авторською редакцією

Відповідальний за випуск  
Дизайн обкладинки  
Художник-ілюстратор  
Комп'ютерне верстання

*Я. О. Серіков  
Г. А. Коровкіна  
В. Е. Абракітов  
Є. Г. Панова*

Підп. до друку 20.11.2013.  
Друк на ризографі  
Тираж 500 пр.

Формат 60 x 84/16  
Ум. друк. арк. 14,7  
Зам. №.

Видавець і виготовлювач:  
Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова,  
вул. Революції, 12, Харків, 61002  
Електронна адреса: [rectorat@kname.edu.ua](mailto:rectorat@kname.edu.ua)  
Свідцтво суб'єкта видавничої справи:  
ДК № 4705 від 28.03.2014